



Escuela de Caminos
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
UPC BARCELONATECH

**“Análisis de revestimientos
prefabricados de túneles
ejecutados con TBM desde el
punto de vista de su
sostenibilidad”**

Trabajo realizado por:

Laura Alejandra Rincón Garzón

Dirigido por:

Javier Pablo Ainchil Lavin

Máster en:

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Barcelona, Julio de 2019

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

TESIS DE MÁSTER

Máster

Ingeniería Estructural y de la construcción

Título

Análisis de revestimientos prefabricados de túneles ejecutados con TBM desde el punto de vista de su sostenibilidad

Autor

Laura Alejandra Rincón Garzón

Tutor

Javier Pablo Ainchil Lavin

Intensificación

Ingeniería estructural y de la construcción

Fecha

Julio de 2019

2019

**ANALISIS DE REVESTIMIENTOS
PREFABRICADOS DE TUNELES
EJECUTADOS CON TBM DESDE EL PUNTO
DE VISTA DE SU SOSTENIBILIDAD**

Laura Alejandra Rincón Garzón

Página intencionalmente en blanco

AGRADECIMIENTOS

Este logro lo agradezco principalmente a mi familia, ya que sin ellos no habría sido posible cumplir este sueño de estudiar fuera de Colombia, y principalmente el apoyo a realizar este máster fue de ellos, también agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad de realizar este TFM y estoy en total agradecimiento con mis profesores durante esta etapa, porque de ellos aprendí bastante; hablando, tanto profesional como personalmente e incluyo especialmente a mi tutor de TFM, ya que estuvo en cada duda, cada problema y cada solución.

RESUMEN

A lo largo del tiempo la ejecución de túneles se ha realizado empleando diversos procesos constructivos, entre los que destaca el abordado en esta tesina mediante equipos de tuneladora Tunneling Boring Machine (TBM). A medida que la misma va perforando el terreno se colocan dovelas para ir componiendo el revestimiento, utilizándose principalmente dos tipos de dovelas: rectangulares y trapezoidales. El presente trabajo analiza las ventajas y desventajas que proporciona cada una de ellas mediante la implementación del método MIVES (Método Integrado de Valor para Evaluaciones de Sostenibilidad), el cual ayuda a tomar decisiones entre diferentes opciones de una manera agregada, teniendo en cuenta indicadores, requerimientos y criterios, que permiten evaluar la sostenibilidad de una determinada solución.

Palabras clave: TBM, dovelas trapezoidales, dovelas rectangulares, sostenibilidad, MIVES

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE GRÁFICAS.....	xi
1. INTRODUCCIÓN	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.1. General.....	13
2.2. Específicos.....	13
3. METODOLOGÍA	14
4. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	15
4.1. Introducción.....	15
4.1.1. Tunnel Boring Machine(TBM)	15
4.1.1.1. Tipos de tuneladoras:	16
4.1.2. Revestimiento de túneles con segmentos de hormigón prefabricado	19
4.1.3. Concepto de sostenibilidad.....	24
4.1.3.2.1. Gestión de residuos de construcción y demolición:	25
4.1.4. Metodología MIVES.....	26
5. INDICADORES Y FUNCIONES DE VALOR:	36
5.1. Requerimiento económico:	37
5.1.1. Coste directo de acero en fabricación:	37
5.1.2. Coste directo de pernos junta circunferencial:.....	39
5.1.3. Tiempo de montaje	40
5.1.4. Frecuencia e importancia de daños:.....	41
5.2. Requerimiento medioambiental:	43
5.2.1. Pérdida agua del acuífero:.....	43
5.2.2. Huella de carbono por refuerzo de acero:	45
5.3. Requerimiento social:	47

5.3.1.	Horas perdidas de montaje:	47
5.3.2.	Conflictividad durante el contrato:	48
6.	CASOS DE ESTUDIO Y RESULTADOS	50
6.1.	INTRODUCCIÓN	50
6.2.	EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES:	51
6.2.1.	Coste directo del acero en fabricación:	51
6.2.2.	Coste directo de pernos junta circunferencial:	52
6.2.3.	Tiempo de montaje:	53
6.2.4.	Frecuencia e importancia de daños:	53
6.2.5.	Pérdida de agua acuífero:	54
6.2.6.	Huella de carbono por refuerzo de acero:	55
6.2.7.	Horas perdidas de montaje:	56
6.2.8.	Conflictividad durante el contrato:	56
6.3.	EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS:	57
6.3.1.	Valor de los indicadores:	57
6.3.2.	Valor de los criterios:	57
6.3.3.	Valor de los requerimientos:	59
6.3.4.	Estudios de sensibilidad:	59
7.	CONCLUSIONES	62
7.1.	Introducción:	62
7.2.	Conclusiones generales:	62
7.3.	Conclusiones específicas:	62
8.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	64
9.	BIBLIOGRAFÍA	65
10.	ANEJOS	67
10.1.	FICHAS TÉCNICAS DEL ICE (INVENTORY OF CARBON AND ENERGY, UK) 67	
10.1.1.	Concreto	67
10.1.2.	Acero	76
10.2.	CÁLCULOS ESTRUCTURALES DE ACERO	80
10.2.1.	DOVELA TRAPEZOIDAL	80
10.2.2.	DOVELA RECTANGULAR	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Componentes de las TBM(FCC Construcción S.A., 1993)	16
Figura 2 Máquina de lodos (Spencer, 2009)	17
Figura 3 Máquina de equilibrio de presión de tierra (Spencer, 2009)	17
Figura 4 Máquina de rocas(Spencer, 2009)	18
Figura 5 Tuneladora doble escudo («Tuneladora de doble escudo - ø 2», s. f.)	19
Figura 6 Proceso constructivo de túneles con revestimiento de segmentos prefabricados o dovelas.(Arnau & Molins, 2012)	20
Figura 7 Geometría de las dovelas actualmente.(Della, Nicola & Castellvi, 2016)	21
Figura 8 Sellos de impermeabilización de juntas(Consult International, 2013)	21
Figura 9 Anillo rectangular(Consult International, 2013)	22
Figura 10 Anillo trapezoidal (Consult International, 2013)	22
Figura 11 Túnel conformado de anillos trapezoidales(«Revestimientos de dovelas prefabricadas», 2016)	22
Figura 12 Geometría de anillo universal en planta(Perri, 2014)	23
Figura 13 Geometría de anillo universal(Perri, 2014)	24
Figura 14 Árbol de requerimientos(Alarcón, 2005)	28
Figura 15 Funciones de valor, descendente y ascendente.(Alarcón, 2005)	29
Figura 16 Formas de función de valor(Alarcón, 2005)	30
Figura 17 Rango de criterios de desempeño sostenible para la selección del método de construcción.(Chen et al., 2010)	36
Figura 18 Movimientos dovela trapezoidal(Consult International, 2013)	42
Figura 19 Movimientos para el montaje de dovelas rectangulares	42
Figura 20 Impermeabilización en túneles contruidos mediante dovelas prefabricadas(Sánchez, 2003)	44
Figura 21 Bentonita/cemento(Sánchez, 2003)	45
Figura 22 Filtración de agua en túnel de Pajares (Sevillano, 2017)	55
Figura 23 Porcentajes de requerimientos	58
Figura 24 Porcentaje de requerimientos perspectiva económica	60
Figura 25 Porcentajes de requerimiento beneficiando el social y el medioambiental	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Escala de Saaty(Alarcón, 2005)	32
Tabla 2 Índices de consistencia aleatoria(Alarcón, 2005)	33
Tabla 3 Árbol de requerimientos para elección de dovela	37
Tabla 4 Kilogramos de acero por metro lineal de dovela trapezoidal y rectangular	38
Tabla 5 Valor de acero de refuerzo por dovela trapezoidal o rectangular	38
Tabla 6 Huella de carbón generada por hormigón y acero de refuerzo	46
Tabla 7 Puntuación para evaluar la conflictividad durante el contrato	48
Tabla 8 Estimación de pesos para el árbol de requerimientos	50
Tabla 9 Índice de satisfacción para coste directo del acero en fabricación	52
Tabla 10 índice de satisfacción coste directo de pernos junta circunferencial	53
Tabla 11 Índice de satisfacción tiempo de montaje	53
Tabla 12 Índice de satisfacción frecuencia e importancia de daños	54
Tabla 13 Índice de satisfacción pérdida de agua acuífero	55
Tabla 14 Índice de satisfacción huella de carbono por refuerzo de acero	56
Tabla 15 Índice de satisfacción para horas de pérdida de montaje	56
Tabla 16 Índice de satisfacción conflictividad durante el contrato	57
Tabla 17 Índice de satisfacción por indicador	57
Tabla 18 Valor de criterios	58
Tabla 19 Valor de requerimientos	59
Tabla 20 Índice de sostenibilidad total	59
Tabla 21 Índice de sostenibilidad perspectiva económica	60
Tabla 22 Índice de sostenibilidad beneficiando el requerimiento medioambiental y social	61

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Función de valor de costos de la fabricación de acero	39
Gráfica 2 Función de valor del coste directo de pernos junta circunferencial...	40
Gráfica 3 Función de valor del tiempo de montaje de dovelas	41
Gráfica 4 Función de valor de la frecuencia e importancia de daños	43
Gráfica 5 Función de valor de la pérdida de agua acuífero	45
Gráfica 6 Función de valor de huella de carbono por acero de refuerzo	46
Gráfica 7 Función de valor de horas perdidas de montaje	48
Gráfica 8 Función de valor de conflictividad durante el contrato	49

1. INTRODUCCIÓN

Los túneles son indispensables como parte de la comunicación entre ciudades, pueblos, e incluso países, y muy especialmente en entornos urbanos donde a causa de limitaciones de espacio se suelen aplicar para las líneas de metro y ferrocarril.

La construcción va ligada de la sostenibilidad, ya que los procedimientos constructivos afectan en su gran mayoría el entorno en el que se construye, por lo que es importante hacer lo posible para que los impactos ambientales y en particular la contaminación, sean mínimos. Debido a esto ha sido necesario crear programas que faciliten evaluar la sostenibilidad a la hora de construir, ejemplo de ello, se encuentra la herramienta MIVES, el cuál formula un análisis de toma de decisiones multicriterio.

La comparación de dos opciones para la construcción de un túnel por medio de TBM, se plantea entre una dovela rectangular o una dovela trapezoidal, teniendo en cuenta los beneficios de cada una de ellas, para poder relacionar con el tiempo de construcción, la calidad, así como lo relacionado con la afectación al entorno natural. Por ello se estudiarán varios aspectos para comparar estos dos ejemplos de dovelas.

El procedimiento que se realizará con ayuda de MIVES permitirá tomar la decisión de cuál es la dovela que mayores beneficios trae para la construcción y cómo contribuye con la sostenibilidad.

2. OBJETIVOS

2.1. General

El objetivo general de la presente tesina es hacer el análisis y la comparación, desde el punto de vista de la sostenibilidad, posibles alternativas para la construcción de túneles por medio de TBM. Más exactamente se trata de evaluar la construcción con Dovelas Prefabricadas Rectangulares (DPR) o con Dovelas Prefabricadas Trapezoidales (DPT).

Para ello se define un índice de sostenibilidad I_s , que permite hacer la evaluación numérica de las alternativas, el cual varía entre 0 y 1, siendo el límite inferior la alternativa menos recomendada; es decir con una sostenibilidad nula, y el límite superior indica que la alternativa tiene una viabilidad óptima desde el punto de vista sostenible.

Para llegar a una solución del I_s se evalúan 3 requerimientos, el económico, el medioambiental y el social, a los cuales se les distribuyen pesos según la situación.

2.2. Específicos

Para cada requerimiento (económico, medioambiental y social) se debe evaluar una serie de indicadores. Para cada caso pueden resultar infinitos, pero lo que se pretende es seleccionar los más relevantes para la evaluación del caso en particular.

Para hacer la valoración numérica de cada indicador, se debe definir la función de valor para cada uno de ellos, con el cuál se pueda concluir el índice de satisfacción para cada alternativa a evaluar.

Para el análisis se aplican los pesos a cada requerimiento, dándole distintos porcentajes de importancia y así identificar el mayor índice de sostenibilidad que se produce para cada caso, y finalmente, concluir cual resulta siendo la mejor alternativa.

3. METODOLOGÍA

La presente tesina se basa en la construcción de túneles por medio de TBM, de la cual se hace investigación sobre el proceso tecnológico de construcción de túneles y de revestimientos prefabricados. A este respecto se detecta el empleo de revestimiento con juntas longitudinales rectas u oblicuas que dan lugar a las dovelas rectangulares o trapezoidales, es bien entendido que se dispone de una dovela más pequeña llamada llave que es la que se coloca en el último lugar.

Se desarrolló la metodología MIVES teniendo en cuenta la evaluación de la sostenibilidad del revestimiento de túneles ejecutado con dovelas prefabricadas y ensamblado por una TBM, con el objetivo de tomar la decisión sobre emplear revestimientos con dovelas trapezoidales o dovelas rectangulares.

El primer paso que se debe tener en cuenta es la elección de los requerimientos para evaluar las alternativas; es decir, el económico, el medioambiental y el social. Seguido de esto, se hace la estimación de pesos de cada requerimiento, para expresar la satisfacción que representa la elección de cada una de las alternativas.

Siguiente a esto se definen las funciones de valor de los indicadores que se desprenden de cada requerimiento y las tablas de índices de satisfacción.

Para hacer el análisis, se estiman los pesos, dependiendo la importancia que se le de a cada requerimiento. Por ejemplo, si se piensa en la constructora, la importancia del requerimiento económico debe ser mayor que el de los otros dos. Si se quiere hacer una evaluación enfocada en el entorno natural, el porcentaje de peso debe ser mayor para el requerimiento medioambiental. Y por último si se hace un enfoque en el cliente, se debe tener en cuenta el mayor porcentaje de peso para el requerimiento social.

Teniendo los pesos definidos para cada caso, se aplican las ecuaciones dadas por la herramienta MIVES, que evalúan según requerimiento, criterio e indicador, para finalmente llegar al resultado del índice de sostenibilidad y hacer la elección de la mejor alternativa.

4. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

4.1. Introducción

La ejecución de túneles es un campo susceptible para la innovación, dados los grandes beneficios que aporta y los elevados costes asociados. El sistema que emplea TBM (del inglés, Tunnel Boring Machine) es el más eficiente en entornos urbanos porque presenta mejoras en cuanto a sostenibilidad por la reducción de riesgos asociados, el coste que puede ser bastante aquilatado sin dar sorpresas, y también, desde el punto estructural proporciona una solución que es muy satisfactoria.

Al mismo tiempo, el empleo de prefabricados garantiza una calidad de ejecución de los elementos individuales adecuada. No obstante, debe cuidarse con extremo detalle el proceso de montaje dentro del túnel al objeto de que la colocación sea la más adecuada.

4.1.1. Tunnel Boring Machine(TBM)

Las tuneladoras TBM son unas máquinas excavadoras inicialmente pensadas para el frente de roca a sección completa mediante la acción combinada de la rotación y empuje continuados de una cabeza giratoria provista de herramientas de corte convenientemente distribuidas en su superficie frontal, el diámetro de esta máquina, puede estar entre los 2,10 m y los 12 m. (FCC Construcción S.A., 1993)

Se compone de una cabeza giratoria, la cual hace la función del corte del tipo de suelo en el cual se esté haciendo la excavación, codales laterales (en inglés, grippers) que sirven de apoyo para los gatos hidráulicos que se utilizan para el empuje de la máquina y el avance de esta. Últimamente se han desarrollado tuneladoras; que son las más frecuentes, que lo que hacen es, en lugar de apoyarse en los grippers, se apoyan en el revestimiento prefabricado recién construido. Estos equipos proporcionan un mejor funcionamiento en el caso de que la calidad del terreno lateral no sea la adecuada y son los que se están imponiendo en los proyectos en su mayoría urbanos, e incluso en algunos proyectos interurbanos donde no existe seguridad sobre las características del terreno. Para los residuos que se generen estas máquinas siempre disponen de una cinta transportadora que los lleva hacia el exterior de la obra civil, todas las máquinas TBM tienen estos componentes, pero siempre se debe tener en cuenta el tipo de suelo que se vaya a excavar (roca dura o blanda), para aumentar o reducir algunos de los componentes como los codales laterales. (FCC Construcción S.A., 1993). La figura 1 evidencia los componentes que lleva la TBM según el tipo de suelo que se excave.

En el caso de escudos en presión de tierras, la cinta transportadora se reemplaza por un tornillo de Arquímedes, que al regularse la velocidad de extracción permite mantener una presión estable en el frente y contener las tierras con total seguridad.

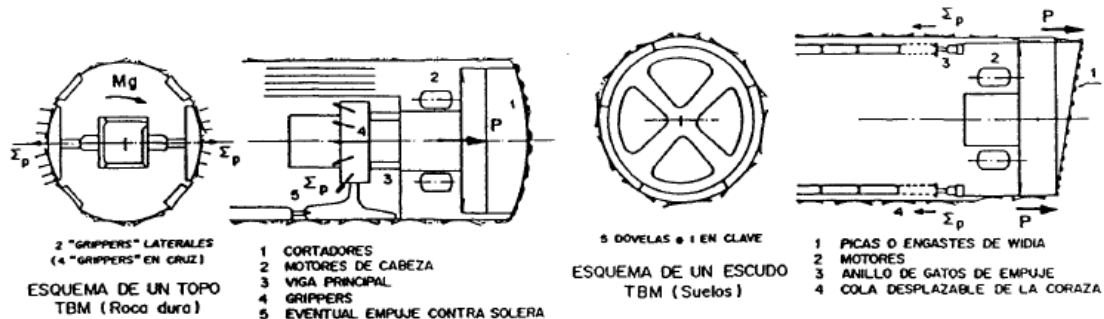


Figura 1 Componentes de las TBM(FCC Construcción S.A., 1993)

El rendimiento de una TBM normalmente se encuentra entre 1,5 y 3,5 m/hora (FCC Construcción S.A., 1993), por lo que la cinta transportadora de escombros debe tener una gran capacidad para poder llevar la cantidad de residuos que se produce a causa de dicho rendimiento.

4.1.1.1. Tipos de tuneladoras:

Los tipos de tuneladoras como ya se mencionó anteriormente dependen del tipo de suelo que se vaya a excavar, ya sea roca dura o blanda, a continuación, se numeran los tipos de tuneladoras y se hace una breve explicación de cada uno.

4.1.1.1.1. Tuneladoras de escudo

Estas tuneladoras excavan con una cabeza que en su frente tiene un escudo el cuál va perforando el suelo, y en la parte trasera tiene la capacidad de ir haciendo la colocación de las dovelas (Morales, 2012), dentro de estas tuneladoras se clasifican así:

Escudo de frente abierto: Su sistema de excavación puede ser manual, mediante un brazo fresador con una cabeza giratoria. (Morales, 2012)

Escudo de frente cerrado: Se aplica para terrenos no cohesivos; es decir, que el terreno es inestable (Morales, 2012), se divide en los siguientes tipos:

- Tuneladoras de lodos:

Se usa especialmente para suelos de dureza variable, el suelo se mezcla con lodo para crear una presión frontal a favor de la excavación. Tal cuál como lo muestra la figura 2 se bombea el suelo mezclado con la lechada, lo cual permite la recirculación para poder removerlo y así avanzar la

excavación. (Spencer, 2009)

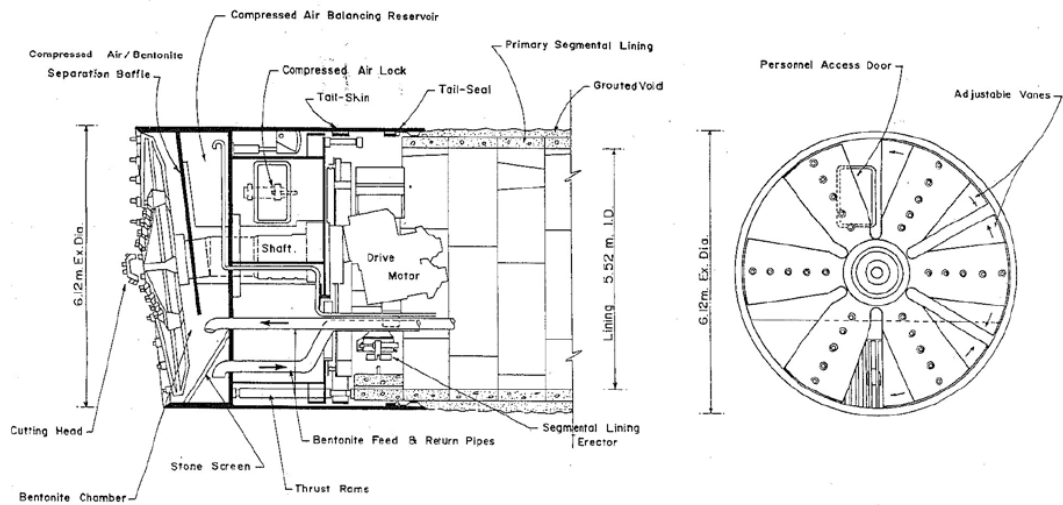


Figura 2 Máquina de lodos (Spencer, 2009)

- Tuneladora de balance de presión de tierra

Es una máquina cerrada y se usa para no cohesivos, la presión positiva se crea con el suelo excavado que se encuentra bajo la presión a través de la rotación del transportador del tornillo y finalmente los escombros se retiran mediante la cinta transportadora de la que se habló anteriormente cuando se nombraron los componentes de las TBM. (Spencer, 2009) Como puede verse en la figura 3 las diferentes dovelas se van colocando y constituyendo los anillos, y existen unos cilindros (Ram) que se apoyan en ellos, de esta manera se resuelven los problemas de calidad de terreno que el empleo de grippers llevaba asociado. En este sentido se habla de la solución más empleada últimamente.

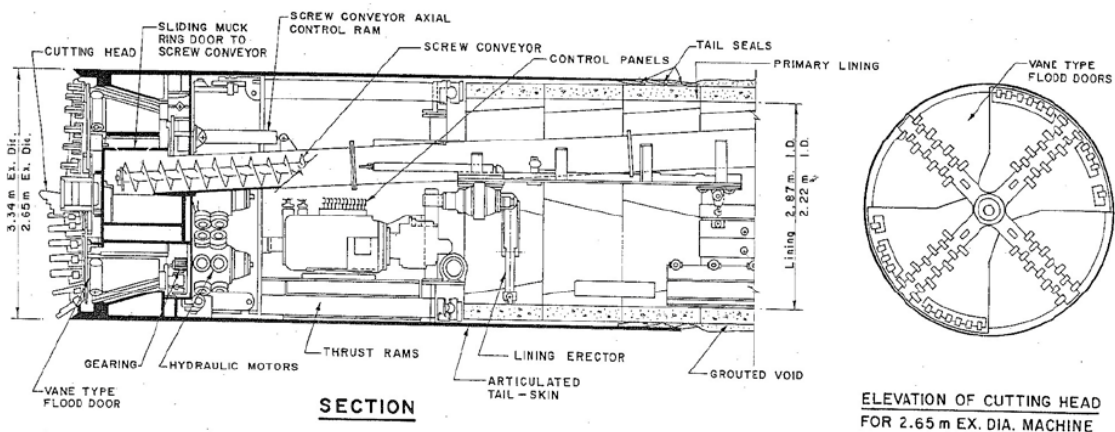


Figura 3 Máquina de equilibrio de presión de tierra (Spencer, 2009)

- Escudos presurizados:

Antiguamente se utilizaba el aire comprimido en los túneles para

presurizar los túneles construidos bajo niveles freáticos no muy relevantes, pero actualmente este tipo de escudos ya no es usual utilizarlos ya que se trabaja en condiciones de la presión atmosférica. (Morales, 2012)

4.1.1.1.2. Tuneladora de roca dura o topo:

Esta tuneladora como su nombre lo indica hace la excavación de rocas, aplastando la roca por los cortadores (discos) que se encuentran en la cabeza giratoria, al igual que las demás los residuos se transportan mediante la cinta transportadora (Spencer, 2009), en la figura 4 se muestra la tuneladora ya mencionada.

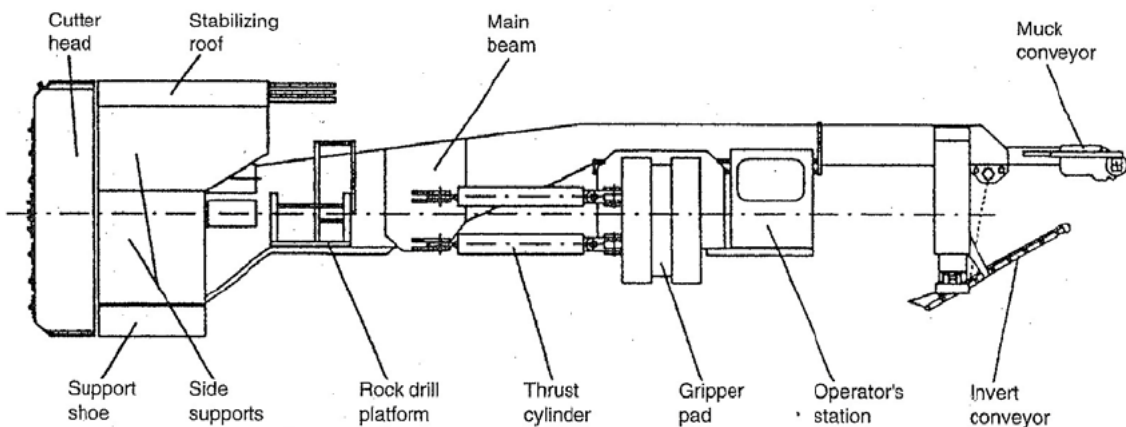


Figura 4 Máquina de rocas (Spencer, 2009)

Existen los **topos ensanchadores** que como su nombre lo indica agrandan túneles para evitar las consecuencias de las fuerzas de agarre en la excavación finalizada, y también hay los **topos para planos inclinados** que son los que realizan túneles con pendientes que están entre el 10% y el 50%. (Morales, 2012)

4.1.1.1.3. Tuneladora de doble escudo

Es de gran solución para trabajar suelos macizos con tramos de tipología suelo-roca, el escudo se divide en dos; donde se encuentra la cabeza de corte, y donde se hace el montaje del anillo de las dovelas. Este sistema demuestra que la cabeza excava, mientras que en la parte de atrás se van montando las dovelas, la figura 5 evidencia la tuneladora de doble escudo.

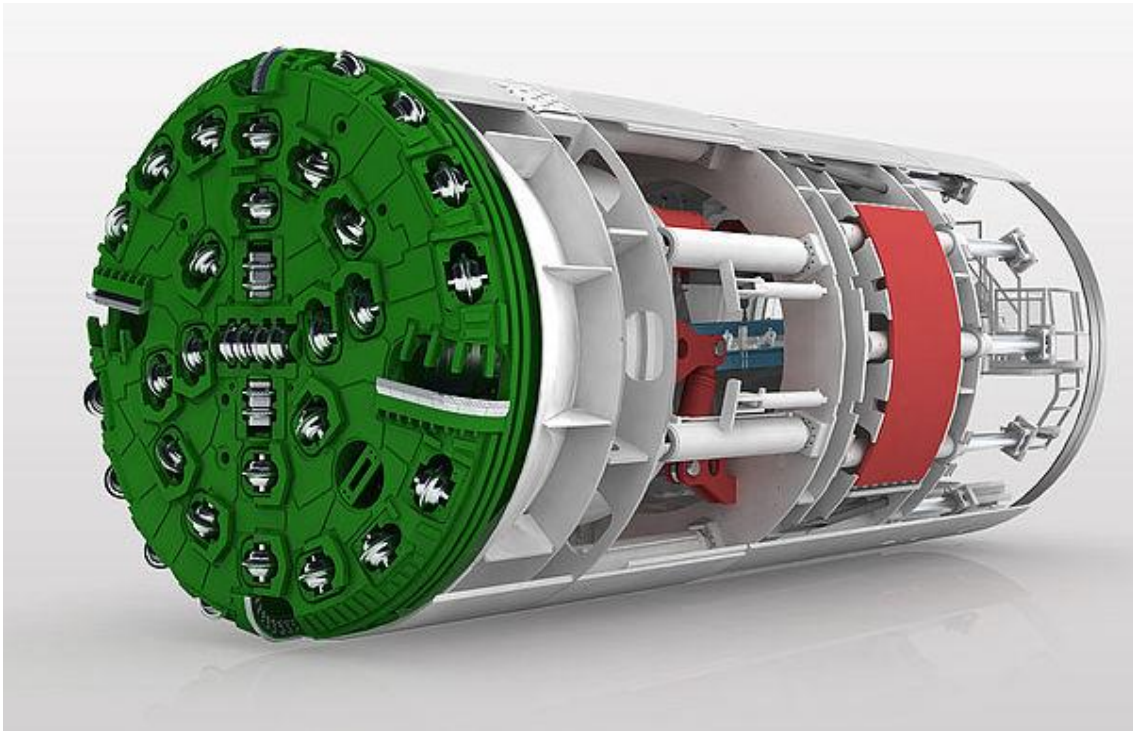


Figura 5 Tuneladora doble escudo («Tuneladora de doble escudo - Ø 2», s. f.)

4.1.2. Revestimiento de túneles con segmentos de hormigón prefabricado

4.1.2.1. Introducción

El revestimiento de túneles con segmentos de hormigón prefabricado se puede definir como una secuencia de un proceso constructivo, conformado por elementos prefabricados denominados dovelas, las cuáles posteriormente, forman anillos, y a su vez éstos al completar toda la circunferencia del túnel van siendo juntados con otros anillos, para así completar el túnel esperado. (Cardozo, 2019)

Según Arnau y Molins, el revestimiento ejecutado con segmentos prefabricados y el vaciado directamente in situ, son diferentes, debido a la configuración de las uniones, la interacción del terreno con la estructura y la capacidad de la redistribución real de la carga del revestimiento entre anillos adyacentes. (Arnau & Molins, 2012)

4.1.2.2. Dovelas:

Las dovelas son segmentos prefabricados de forma semicircular, los cuales al ser encadenados el uno con el otro llegan a formar un anillo según el diámetro interno deseado. Al momento de unir varias secciones de anillos, se empieza a dar forma al túnel deseado. (Cardozo, 2019)

La figura 6 muestra el proceso constructivo empleado en los túneles

revestidos con segmentos prefabricados y cada una de sus partes.

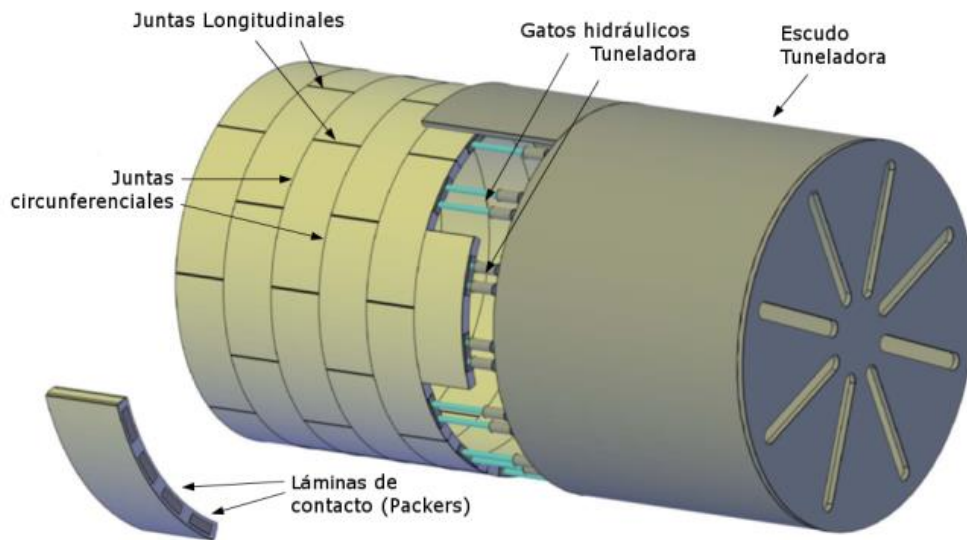


Figura 6 Proceso constructivo de túneles con revestimiento de segmentos prefabricados o dovelas. (Arnau & Molins, 2012)

Alrededor de los años 60 se hacía la fabricación de túneles por medio de dovelas con un ancho de aproximadamente 600 mm, las cuales eran un revestimiento primario, ya que posteriormente se formaba un revestimiento secundario que eran paneles de hormigón o era vaciado in situ. (Cardozo, 2019)

Las tuneladoras TBM introdujeron la construcción de los anillos de forma mecánica ya que antiguamente se realizaba manualmente, lo cuál impidió la utilización de tornillos para juntar las dovelas, ya que actualmente, se introduce una dovela en forma de cuña (denominada dovela llave), la cual provoca que los demás segmentos se expandan contra el terreno y se comprima el anillo, sin necesidad de utilizar tornillos. La impermeabilización del túnel es uno de los factores complicados de controlar, pero para ello fue necesario sustituir lo que antes era la cuerda impregnada de alquitrán por juntas hidrófilas permanentes, las cuales se instalaban en unas dovelas que tenían como objetivo la impermeabilización del túnel. (Cardozo, 2019)

Anteriormente, los anillos eran formados por dovelas totalmente paralelas y tenían dos dovelas llave para el cierre, pero actualmente se empezaron a poner dovelas llave de forma trapezoidal (fig 7) para mejorar la construcción y se podían instalar de forma mecánica. (Cardozo, 2019)

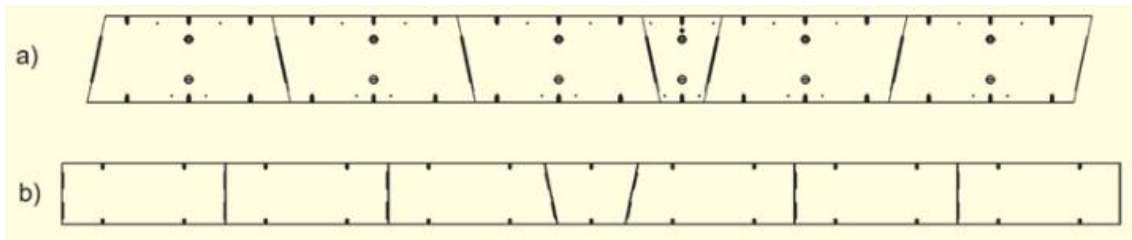


Figura 7 Geometría de las dovelas actualmente.(Della, Nicola & Castellvi, 2016)

El apartado a) muestra la geometría de los anillos con dovelas trapezoidales y el apartado b) muestra la geometría de los anillos con dovelas rectangulares, las cuales se estudiarán en la presente tesina.

Las juntas de las dovelas se encuentran selladas por unos gaskets (sellos de impermeabilización) cuya función como ya lo dice su nombre es impermeabilizar las juntas para evitar el paso del agua, en la figura 8 se muestra la forma de estos elementos.



Figura 8 Sellos de impermeabilización de juntas(Consult International, 2013)

4.1.2.3. Anillo rectangular:

En este tipo de anillo se colocan las dovelas rectangulares y siempre van en la misma posición, de anillo a anillo se intercalan las dovelas haciendo un giro hacia la derecha o la izquierda, también tienen una terminación con las dovelas llave, las cuales necesitan de tornillos para poder cerrar el anillo. Este tipo de anillos se utilizan en túneles rectos o con radios de curvatura superiores a 1500 m. («Revestimientos de dovelas prefabricadas», 2016)

La figura 9 evidencia la posición de las dovelas y la dovela llave para estos

anillos.

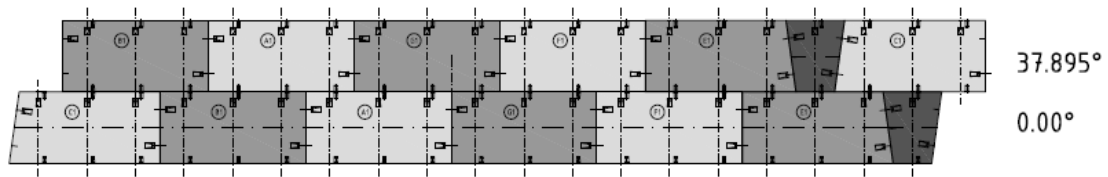


Figura 9 Anillo rectangular(Consult International, 2013)

4.1.2.4. Anillo trapezoidal:

Anteriormente el anillo trapezoidal era formado por 6 dovelas trapezoidales, a las que se les podía llamar a 3 llaves y a tres contrallaves. Tenía una desventaja y era que dificultaba la compresión de todas las juntas y no se podía asegurar la estanqueidad del revestimiento de agua, ya que la colocación de las dovelas llave y contrallave no era la mejor, porque siempre se debe colocar una dovela llave a lado y lado de la primera dovela instalada.(Cardozo, 2019). En la figura 10 se puede ver la conformación del anillo trapezoidal.

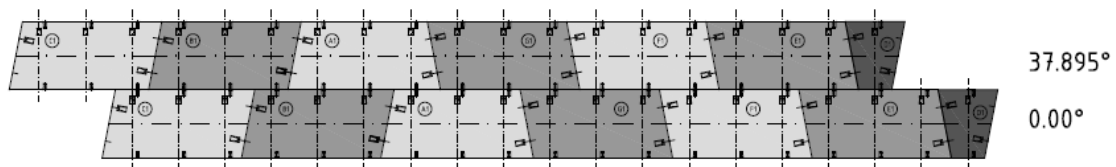


Figura 10 Anillo trapezoidal (Consult International, 2013)

La figura 11 muestra un anillo formado por dovelas trapezoidales idénticas, en el cuál fue un problema el atornillado, ya que anteriormente se atornillaban en las juntas radiales y en las circunferenciales, la solución fue hacer orificios curvados con pernos también curvados para poder conectar dichas dovelas.(Cardozo, 2019)

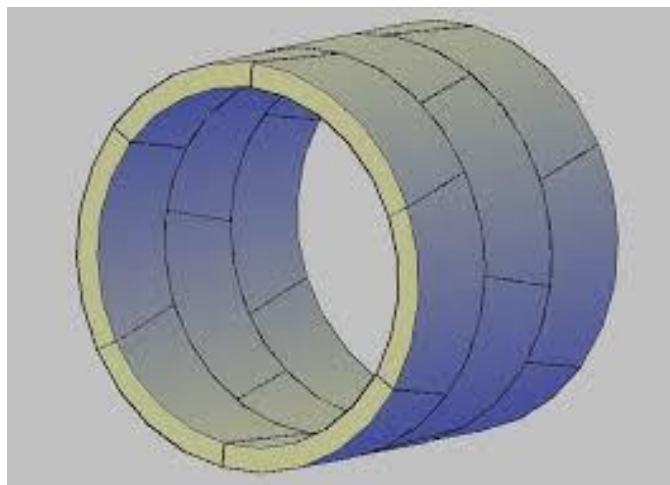


Figura 11 Túnel conformado de anillos trapezoidales(«Revestimientos de dovelas prefabricadas», 2016)

4.1.2.5. Anillo Universal:

Este anillo se conforma, o bien de segmentos trapezoidales con llave y contrallave, o de segmentos rectangulares que incluyen una llave. El anillo universal lo que busca es que sea siempre igual el tipo de anillo que se emplea y por esta manera las dos secciones circunferenciales no son paralelas, la característica principal de las dovelas que la componen es su conicidad, es decir, la diferencia entre la longitud máxima y mínima.(Perri, 2014). Gracias a esta variación se permite combinar diferentes anillos consecutivamente al objeto de introducir curvas a la derecha, izquierda, arriba o abajo. En este sentido, una de las decisiones más importantes que toma el jefe de la tuneladora al terminar de construir un anillo, es decidir la posición que tendrá el anillo consecutivo que se pondrá posteriormente, es decir, debe evitar que las juntas longitudinales coincidan, o estén muy próximas, con el objetivo de no debilitar el revestimiento. Este fenómeno se suele llamar juntas en cruz y es uno de los parámetros más sensibles durante el ensamblaje de los segmentos que componen el revestimiento ejecutado con tuneladora.

La figura 12 y 13 muestra la unión de las dovelas en plano y en forma de anillo, respectivamente.

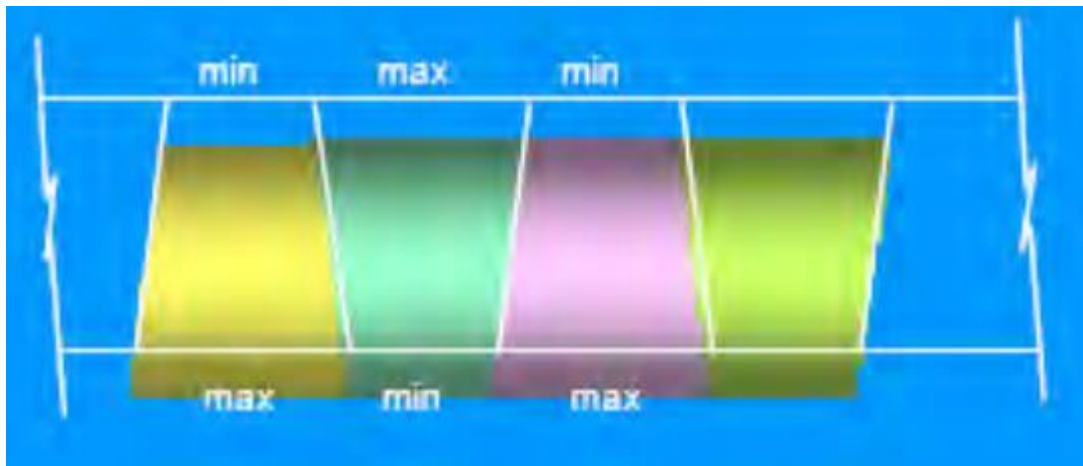


Figura 12 Geometría de anillo universal en planta(Perri, 2014)

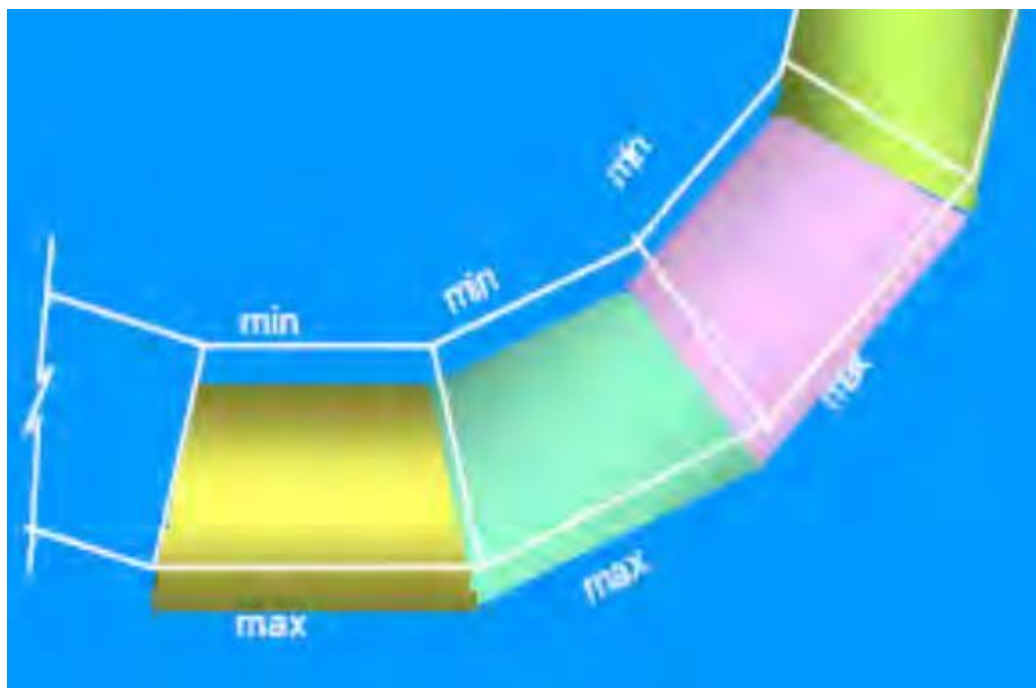


Figura 13 Geometría de anillo universal(Perri, 2014)

4.1.3. Concepto de sostenibilidad

4.1.3.1. Introducción

El término de la sostenibilidad se refiere a que un producto, un proceso, una solución, una decisión se materialice sin hacer ningún impacto negativo en el medio en el que éste mismo influya, teniendo en cuenta que se prolongue en el tiempo de forma indefinida. (Aguado de Cea, Josa García-Tornel, & Alavedra Ribot, 2006)

La sostenibilidad estaba planteada como crecimiento sostenible, pero en muchas ocasiones se hizo el análisis del significado y se dedujo que lo que significa no se trata de un crecimiento sino de un desarrollo, por lo tanto, quedó designada como desarrollo sostenible, ya que se puede interpretar como una mejora o un incremento cualitativo, más no, cuantitativo; lo cual es lo que significa la palabra “crecimiento”.(Aguado de Cea et al., 2006)

La sostenibilidad abarca tres factores importantes: la economía, la sociedad y el medio ambiente, por ello, depende de lo que se trabaje se aplica sostenibilidad a alguno de estos. Ejemplos de la sostenibilidad según factor, ordenados respectivamente, pueden ser, las empresas pueden generar un desarrollo económico sostenible cuando logran que sus proyectos sean financieramente exitosos, tengan un trato digno con los trabajadores y sus clientes y también generen buenos ingresos a sus empleados.(Gallopin, 2003)

La sostenibilidad social quiere decir apoyo a la comunidad, ejemplo el cuál puede ser la UNICEF. Y para la sostenibilidad ambiental se refiere a cuidar los

recursos naturales y a conservarlos como, por ejemplo, en la actualidad existen; en temas de construcción, los edificios verdes.(Gallopín, 2003)

4.1.3.2. Sostenibilidad en el sector construcción

La sostenibilidad aplicada a la construcción no puede solucionar directamente problemas ecológicos ni ambientales, pero lo que sí puede hacer para las empresas constructoras es mejorar su economía, y también en cuanto a sostenibilidad, generar mayor empleabilidad para la sociedad, ya que este es uno de los sectores con mayor demanda de ejecución en todo el mundo.

Las nuevas tecnologías son de gran ayuda para la sostenibilidad, ya que le dan innovación a ciertos procedimientos constructivos, lo que sirve para optimizar tiempos de trabajo, tener mayor calidad para entregar un proyecto y satisfacer al cliente.

Con ayuda de la sostenibilidad aplicada a la construcción se está contribuyendo al medio ambiente, ya que en muchos de los proyectos se hace la reutilización de los residuos de excavación para plantar árboles y plantas de distintas especies según su hábitat, también según las especies que se encuentren en el terreno que se va a utilizar, se hacen reservas naturales para poderlas llevar allí y que puedan disfrutar de un gran entorno.

Los parámetros principales que se deben tener en cuenta para la sostenibilidad en la construcción son:

4.1.3.2.1. Gestión de residuos de construcción y demolición:

Mejora la sostenibilidad ambiental y la calidad de vida de las personas, ya que por medio de éste se clasifican los materiales posibles que se generan en las obras civiles y se hace la reutilización y reciclaje de estos.(Chen, Okudan, & Riley, 2010)

4.1.3.2.2. Huella de carbono:

La reducción de la huella de carbono que genera la construcción se realiza mediante la no utilización de materiales que produzcan efecto invernadero, la reutilización y reciclaje de los residuos producidos en las obras civiles, esto contribuiría en la sostenibilidad ambiental y social ya que implica a la naturaleza y a las personas que viven alrededor de cada obra que se ejecute.(Domoterra,

2016)

4.1.3.2.3. Consumo de energía y agua:

En las obras de construcción el consumo de energía por iluminación es muy grande especialmente por la iluminación y el aire acondicionado y el consumo de agua debería reducirse, haciendo la utilización de las aguas lluvias para algunos procesos que se realizan en las obras.(Yang & Ren, 2015)

4.1.3.2.4. Consumo de combustible:

Gracias a la cantidad de transportes que hay que hacer en una obra, el traslado de un material y otro, el consumo de combustible es muy alto, por lo que la facilidad de tener las plantas de hormigón dentro de las mismas obras es uno de los factores que puede ayudar a la contribución con el medio ambiente. (Yang & Ren, 2015)

4.1.4. Metodología MIVES

4.1.4.1. Introducción

Actualmente se han ido creando modelos simplificados de conjunto para hacer una evaluación cualitativa y en algunos casos cuantitativa de una obra civil como, por ejemplo, el modelo norteamericano “Leadership in Energy and Environmental Design System” el cual evalúa el emplazamiento, la eficiencia en el uso del agua, la utilización de energías renovables y materiales reciclados, la innovación en los procesos constructivos que contribuyen a la sostenibilidad. Estos aspectos son evaluados en los proyectos y así es que se consigue o no una certificación LEED.(Díaz Querol, 2016)

4.1.4.2. Definición

Es una combinación de técnicas basado en el análisis de valor, volviendo variables diferentes en una sola, tomando en cuenta la importancia de cada aspecto que se vaya a evaluar.(Díaz Querol, 2016). Para poder realizar el análisis de un proyecto por medio de esta metodología se deben tener en cuenta los siguientes pasos:

- Definición del problema a resolver y decisiones a tomar
- Elaboración del esquema para realizar las evaluaciones de cada uno de sus niveles: requerimientos, criterios e indicadores.
- Indicar funciones de valor para cada variable, para convertir; tanto las

cualitativas como las cuantitativas.

- Estimación de pesos
- Calificación de las alternativas
- Evaluación de las alternativas
- Selección y justificación de la mejor alternativa

Detallando cada uno de ellos así:

Definición del problema a resolver y decisiones a tomar:

El problema a resolver es la eficiencia y mejoría en cuanto a la sostenibilidad de la construcción de los túneles y las decisiones a tomar son qué tipo de dovela es mejor para la construcción de túneles por medio del TBM.(Díaz Querol, 2016)

Elaboración del esquema de requerimientos:

Este esquema normalmente es denominado árbol de requerimientos, donde se organizan las características del proceso a evaluar en tres niveles: requerimientos, criterios e indicadores.(Aguado de Cea et al., 2006)

Lo que hace este árbol de requerimientos es facilitar el proceso a evaluar para que cualquier persona que intervenga, entienda el objetivo del proyecto, también sirve para facilitar los cálculos posteriores. En la figura 14 se evidencia la estructura de dicho esquema.

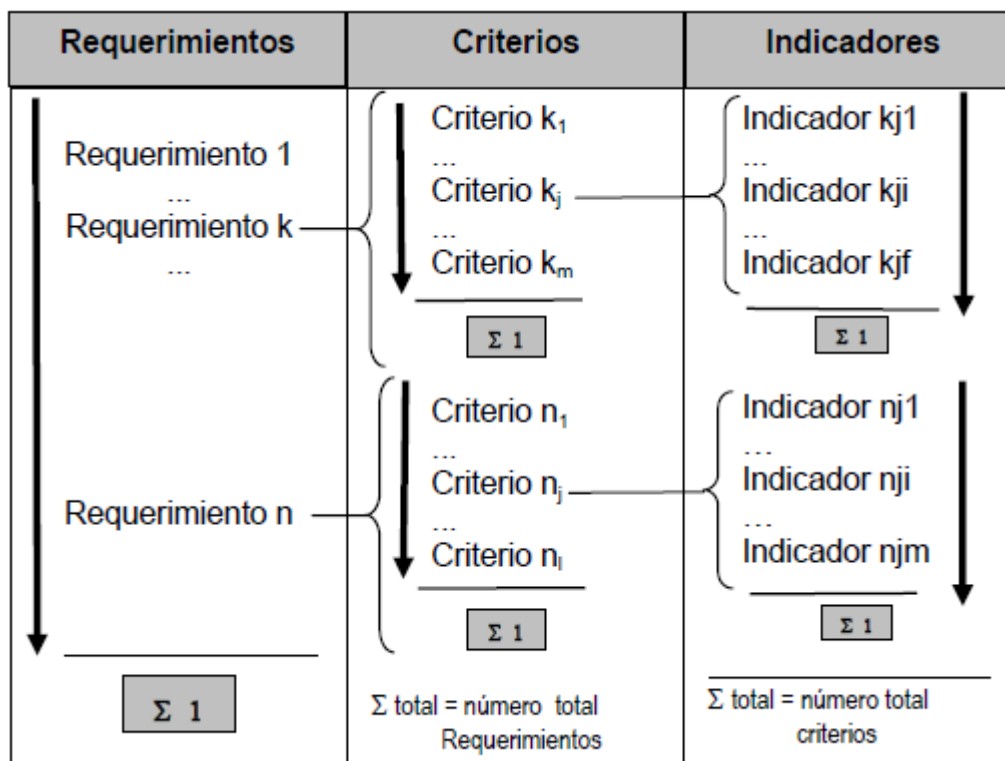


Figura 14 Árbol de requerimientos(Alarcón, 2005)

Indicar funciones de valor:

Se mide la satisfacción del evaluador con respecto a la respuesta que genera una alternativa a cierto indicador, todas las unidades de los indicadores se homogenizan, volviéndolos numéricos, los cuales se indican entre 0 y 1, indicando el mínimo y el máximo grado de satisfacción, respectivamente.(Aguado de Cea et al., 2006) Para hacer la construcción de las funciones de valor se debe tener en cuenta:

- **Definir la tendencia de la función de valor:**

Esta puede ser descendente o ascendente, dependiendo del indicador. Las funciones de valor de forma descendente se utilizan, generalmente, para el tiempo de ejecución del proyecto o para el coste del proyecto, la función de valor descendente es inversamente proporcional, ya que un aumento en su medida disminuye la satisfacción del encargado al momento de tomar la decisión.(Aguado de Cea et al., 2006)

La función de valor ascendente, por el contrario, indica que un aumento en su unidad da un crecimiento a la satisfacción del encargado al tomar la decisión, se puede emplear; en una obra, para la vida útil de un edificio o la capacidad mecánica de los materiales utilizados. En la figura 15 se muestran las funciones de valor ascendente y descendente, a la izquierda y derecha,

respectivamente.(Aguado de Cea et al., 2006)

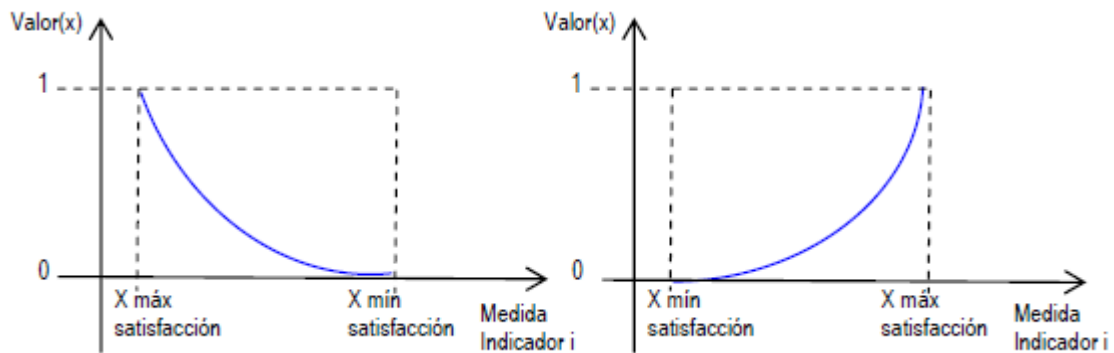


Figura 15 Funciones de valor, descendente y ascendente.(Alarcón, 2005)

Puede haber funciones de valor mixtas, es decir, tienen tramos ascendentes y descendentes. Se utilizan cuando generan insatisfacción y satisfacciones a la vez.

- **Identificar los puntos de mínima y máxima satisfacción:**

Los puntos de mínima y máxima satisfacción definen los límites de la función de valor(Díaz Querol, 2016), para identificar los límites se debe tener en cuenta:

- *Utilizar la normativa vigente:* Dependiendo del indicador, se mira la normativa respectiva y se definen los límites.
- *Condiciones propias:* Según las necesidades de la propiedad, si los indicadores no se rigen de una normativa.
- *Comparación entre ofertas:* Se elegirán las ofertas menos y más favorable, con respecto al punto de menor y mayor satisfacción.

- **Definir la forma de la función de valor:**

Los puntos de mínima y máxima satisfacción se deben unir por medio de una curva cóncava, convexa, recta o en forma de S como se muestra en la figura 16.

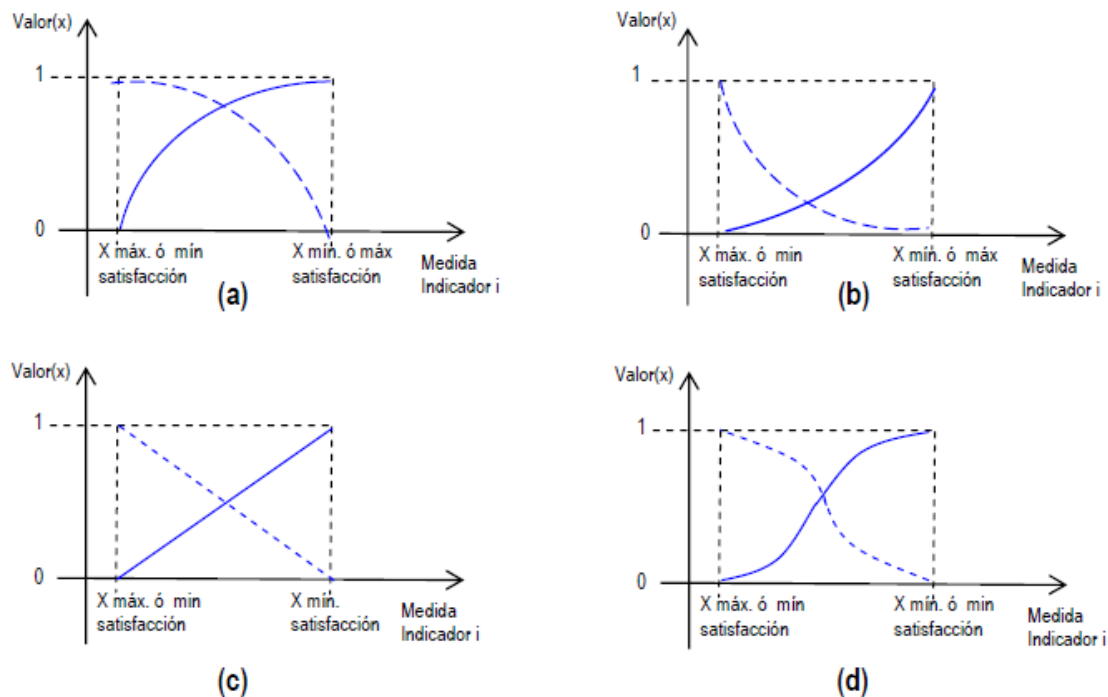


Figura 16 Formas de función de valor (Alarcón, 2005)

La función (a) indica la función de valor convexa, se caracterizan por un aumento de valor en el punto mínimo de satisfacción, disminuyendo el incremento de valor a medida que la respuesta se acerca al punto máximo de satisfacción. Se aplica a los indicadores que tengan una normativa definida (medioambiental, de seguridad y salud). (Aguado de Cea et al., 2006)

La función (b) es la función de valor cóncavas, las cuáles presentan un mínimo aumento del valor menor cuando está en el punto mínimo de satisfacción que en los valores más cercanos al punto máximo de satisfacción. Se adaptan para los indicadores que están relacionados con la propiedad (tipo económico y temporal). (Aguado de Cea et al., 2006)

La función (c) es la función de valor rectas, representan un aumento constante a lo largo del rango de respuesta de las alternativas. Se puede usar en indicadores como la mano de obra. (Aguado de Cea et al., 2006)

La función (d) es la función de valor en forma de S, el aumento de valor máximo se da en la mitad del rango de respuestas, mientras que el menor se da cercano a los puntos de mínima y máxima satisfacción. (Aguado de Cea et al., 2006)

- **Definir matemáticamente la función de valor:**

Según (Aguado de Cea et al., 2006) se propone la siguiente ecuación para modelizar la función de valor de manera matemática:

$$V_{ind} = A + B * \left[1 - e^{-K_i * \left(\frac{|X_{ind} - X_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right] \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

A = Valor que genera la abcisa " X_{min} ", normalmente $A = 0$

X_{min} = Abscisa del indicador que genera un valor igual a " A "

X_{ind} = Abscisa del indicador evaluado que genera un valor V_{ind}

P_i = El factor que define la forma de la curva, para cóncava valores de $P_i < 1$, convexas o forma de "S" si $P_i > 1$ y rectas $P_i \approx 1$, este factor también determina la pendiente de la curva en el punto de inflexión de coordenadas (C_i, K_i)

K_i = Valor aproximado de la ordenada del punto C_i

B = Este valor permite que la función se mantenga en un rango de valor entre 0 y 1, y siempre el 1 indica la mejor respuesta. Se define por la siguiente ecuación:

$$B = \left[1 - e^{-K_i * \left(\frac{|X_{ind} - X_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]^{-1} \quad \text{Ecuación 2}$$

X_{min} = Abscisa del indicador que genera un valor igual a 1

Estimación de pesos:

Cuando se hace un análisis de sostenibilidad, se debe hacer el cálculo de los pesos de cada requerimiento, criterio e indicador. Para hacer este cálculo se recomienda hacer la metodología AHP (Analytical Hierarchy Process; siglas en inglés) (Aguado de Cea et al., 2006), la cual depende de 3 pasos:

- *Construcción de la matriz de decisión:* Es una matriz cuadrada " X " de $n \times n$; donde n , es la cantidad de indicadores o requerimientos, los valores que toma la matriz se calculan de acuerdo con la tabla 1 que muestra la escala de Saaty. (Aguado de Cea et al., 2006)

Tabla 1 Escala de Saaty(Alarcón, 2005)

ESCALA DE SAATY			
Hipótesis: i más importante que j		Hipótesis : i menos importante que j	
Escala General	Escala Verbal	Escala General	Escala Verbal
1	Igual importancia	1	Igual importancia
2	Preferencia intermedia entre 1-3	½	Preferencia intermedia entre 1 -1/1.3
3	Moderadamente más importante	1/3	Moderadamente mas importante
4	Preferencia Intermedia entre 1.3-1.5	¼	Preferencia intermedia entre 1/1.3-1/1.5
5	Más importante	1/5	Mas importante
6	Preferencia intermedia entre 1. 5-1.7	1/6	Preferencia intermedia entre 1/1.5-1/1.7
7	Mucho más importante	1/7	Mucho mas importante
8	Preferencia intermedia entre 1.7-1.9	1/8	Preferencia intermedia entre 1/1.7- 1/1.9
9	Extremadamente más importante	1/9	Extremadamente mas importante

- *Cálculo del vector de pesos:* se normalizan los elementos de la matriz cuadrada mediante la ecuación 3, creando una nueva matriz “Y”, cada elemento de la primera matriz se divide entre la sumatoria de los elementos de la columna donde se encuentra.(Aguado de Cea et al., 2006)

Ecuación 3

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}$$

Con los componentes de la matriz “Y” se calcula el vector de pesos mediante la ecuación 4. Cada uno de los elementos de este vector es el peso de cada indicador evaluado.

$$Z_i = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ij}}{n}$$

Ecuación 4

- *Evaluación de la consistencia:* Se evalúa mediante la relación de consistencia CR (consistency ratio) con las siguientes ecuaciones:

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} \right) * Z_j$$

Ecuación 5

La consistencia se calcula así:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \leq 0.1$$

Ecuación 6

Donde,

C.R.= Relación de consistencia

C.I.= Índice de consistencia

R.I.= Índice de consistencia aleatoria

C.I. se calcula mediante la ecuación:

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Ecuación 7}$$

El R.I. se obtiene de una matriz de decisión generada de forma aleatoria, dependiendo de los valores que se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 2 Índices de consistencia aleatoria(Alarcón, 2005)

Tamaño Matriz n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Índice aleatoriedad	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Para las matrices con $n \leq 2$ no se necesita verificación de C.I. porque siempre es 0. En caso de que $C.R. > 0.1$, se deben revisar los valores asignados en la matriz "X" y repetir el procedimiento, hasta que C.R. cumpla con la condición ya nombrada.(Aguado de Cea et al., 2006)

Calificación de las alternativas:

Para hacer la calificación de las alternativas se debe tener en cuenta la siguiente ecuación:

Ecuación 8

$$RA_{i,j} = RPA_{i,j} + RRA_{i,j}$$

Dónde,

$RA_{i,j}$ = Respuesta de la alternativa i al indicador j

$RPA_{i,j}$ = Respuesta probabilística de la alternativa i al indicador j

$RRA_{i,j}$ = Repercusión de los riesgos de la alternativa i en el indicador j

Para el cálculo de la $RPA_{i,j}$ se debe hacer una estimación puntual y una estimación en forma de rango de respuestas. Donde en la primera, se obtiene un valor esperado de la respuesta de las alternativas al indicador evaluado. La segunda, tiene una serie de respuestas para el indicador.(Aguado de Cea et al., 2006)

Para calcular el rango de respuestas:

$$V_i = \mu \pm \sigma \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde,

μ = Es la media del rango

σ = Desviación estándar

Para calcular $RRA_{i,j}$ se tiene en cuenta la ecuación:

$$RRA_{i,j} = \sum_{z=1}^n P_z * S_z \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde,

P_z = Probabilidad de ocurrencia del riesgo z

S_z = Repercusión del riesgo z en el indicador i, en el caso de ocurrencia de este.

La ventaja de este procedimiento es evitar el riesgo que pueden generar los indicadores con anticipación, por lo cual es beneficioso para la toma de decisiones de cualquier actividad. (Aguado de Cea et al., 2006)

Evaluación de las alternativas:

Según (Aguado de Cea et al., 2006) se realiza teniendo en cuenta el nivel de los indicadores, el nivel de criterios y el nivel de requerimientos.

A nivel de indicadores se introduce el rango de respuesta de la alternativa en la función de valor, obteniendo un valor mínimo y máximo en cada indicador.

A nivel de criterios, el cálculo se realiza en base a los rangos obtenidos de los indicadores, mostrándolo así en la ecuación 11.

$$VC_k R_n = \sum_{i=1}^j WI_i C_k R_n * VI_i C_k R_n \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde,

$VC_k R_n$ = Rango de valor del criterio k en el requerimiento n

$WI_i C_k R_n$ = Peso del indicador i del criterio k del requerimiento n

$VI_i C_k R_n$ = Rango del valor del indicador i del criterio k del requerimiento n

A nivel de requerimientos, es similar al cálculo a nivel de criterios, con la ecuación 12.

$$VR_n = \sum_{k=1}^z WC_k R_n * VC_k R_z \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde,

VR_n = Rango de valor del requerimiento n

WC_kR_n = Peso del criterio k del requerimiento n

VC_kR_n = Rango del valor del criterio k del requerimiento n

Selección y justificación de la mejor alternativa:

Se elige la opción que cumpla con los requisitos. No necesariamente se debe escoger la que mejor índice de sostenibilidad tenga. (Díaz Querol, 2016)

5. INDICADORES Y FUNCIONES DE VALOR:

Anteriormente se explicó el modelo que se va a utilizar para hacer la clasificación de los indicadores y la construcción de las funciones de valor, el cuál ayuda a hacer la comparación de las dos alternativas de dovelas que se tendrán en cuenta en la presente tesina. Por ello, en este capítulo se presentará el árbol de requerimientos e indicadores al cuál se le va a hacer la evaluación según la herramienta MIVES.

Para hacer la clasificación de los requerimientos, criterios e indicadores, se tuvo en cuenta la siguiente figura, de la cual se hizo la elección de los indicadores que pesan más para la presente tesina.

Sustainable performance criteria	Valid percentage for score of (%)					Severity Index	Ranking by category	Overall ranking	Importance level
	1	2	3	4	5				
<i>Economic criteria</i>									
E1: construction time	1.1	1.1	9.5	47.3	41.0	0.852	1	1	H
E2: initial construction costs	1.1	1.1	17.9	38.8	41.1	0.835	2	2	H
E15: constructability (buildability)	0.0	2.1	12.6	51.6	33.7	0.834	3	3	H
E13: material costs	1.1	0.0	23.2	32.6	43.1	0.833	4	4	H
E12: lead-times	2.1	3.2	15.8	45.2	33.7	0.810	5	5	H
E10: loading capacity	0.0	9.5	21.1	32.6	36.8	0.793	6	6	M-H
E7: durability	4.2	5.3	24.2	32.6	33.7	0.773	7	8	M-H
E14: labor costs	2.1	9.5	27.4	42.1	18.9	0.732	8	9	M-H
E8: the speed of return on investment	3.2	11.6	30.5	28.4	26.3	0.726	9	11	M-H
E11: integration of building services	2.1	8.4	31.6	42.1	15.8	0.722	10	13	M-H
E5: life cycle costs	5.3	13.7	28.4	28.4	24.2	0.705	11	16	M-H
E6: defects and damages	7.4	7.4	29.4	40.0	15.8	0.699	12	17	M-H
E3: maintenance costs	2.1	19.0	28.4	33.7	16.8	0.688	13	18	M-H
E16: integration of supply chains (logistics)	5.3	12.6	37.9	37.9	6.3	0.655	14	21	M-H
E9: flexibility (adaptability)	9.5	17.9	34.7	26.3	11.6	0.625	15	24	M-H
E4: disposal costs	25.3	28.4	33.6	9.5	3.2	0.474	16	33	M
<i>Social criteria</i>									
S5: workers' health and safety	3.1	5.3	27.4	23.2	41.0	0.787	1	7	M-H
S4: aesthetic options	2.1	11.6	28.4	36.8	21.1	0.726	2	10	M-H
S1: health of occupants	7.4	9.5	25.2	30.5	27.4	0.722	3	14	M-H
S3: physical space	2.1	12.6	32.6	33.8	18.9	0.710	4	15	M-H
S6: labor availability	4.2	12.6	41.1	27.4	14.7	0.672	5	19	M-H
S7: community disturbance	7.4	16.8	35.8	25.3	14.7	0.646	6	23	M-H
S8: traffic congestion	10.5	16.8	37.9	25.3	9.5	0.613	7	26	M-H
S2: influence on job market	5.3	24.2	42.1	23.1	5.3	0.598	8	30	M
<i>Environmental criteria</i>									
P3: energy efficiency in building use	7.4	10.5	24.2	28.4	29.5	0.724	1	12	M-H
P2: recyclable/renewable contents	4.2	22.1	26.3	32.6	14.8	0.663	2	20	M-H
P1: site disruption	5.3	16.8	33.7	37.9	6.3	0.646	3	22	M-H
P7: waste	10.5	20.1	28.4	32.6	8.4	0.617	4	25	M-H
P6: energy consumption	13.6	15.8	31.6	29.5	9.5	0.611	5	27	M-H
P4: reusable/recyclable elements	10.5	20.0	33.7	25.3	10.5	0.611	6	28	M-H
P5: material consumption	10.5	17.9	36.8	26.3	8.5	0.609	7	29	M-H
P8: pollution generation	13.7	20.0	31.6	24.2	10.5	0.596	8	31	M
P9: water consumption	22.1	17.9	36.8	15.8	7.4	0.537	9	32	M

Figura 17 Rango de criterios de desempeño sostenible para la selección del método de construcción. (Chen et al., 2010)

El análisis se realiza bajo los criterios de sostenibilidad y por esto, el árbol de requerimientos se divide en tres grandes factores: el económico, el social y el medioambiental, los cuales permitirán subdividir en diferentes indicadores que permitirán mostrar ventajas y desventajas entre uno y otro tipo de dovela (rectangular o trapezoidal).

La tabla 3 muestra los niveles del árbol de requerimientos escogido, con sus respectivos criterios e indicadores a evaluar.

Tabla 3 Árbol de requerimientos para elección de dovela

Requerimientos	Criterios	Indicadores
Económicos	Costos iniciales de construcción/coste directo/Coste de materiales	I1 Coste directo de acero en fabricación
		I2 Coste directo de pernos junta circunferencial
	Tiempo de construcción/coste indirecto	I3 Tiempo de Montaje
	Defectos y daños	I4 Frecuencia e importancia daños
Medioambiental	Afectaciones por entrada de agua	I5 Perdida agua del acuífero
	Huella de carbono (emisiones, energía)	I6 Huella de carbono por refuerzo en acero
Social	Seguridad y satisfacción en el montaje	I7 Horas perdidas en montaje
	Daño en reputación con el cliente	I8 Conflictividad durante el contrato

En este capítulo se hará un abreviado descripción de cada uno de los requerimientos e indicadores, se calculará la función de valor de cada indicador, y se mostrarán las gráficas correspondientes a cada uno.

5.1. Requerimiento económico:

En este requerimiento se evalúan todos los costes que estén implicados para la construcción del túnel, teniendo en cuenta el tipo de dovela, y también los costes que se puedan generar en su mantenimiento, o por defectos y daños de construcción.

5.1.1. Coste directo de acero en fabricación:

Para hacer la función de valor de este indicador se tuvo en cuenta el coste directo que se produce en la fabricación del anillo, es decir se debió mirar el precio de la mano de obra y los materiales utilizados.

Según trabajos realizados sobre el comportamiento estructural comparado entre dovelas rectangulares y trapezoidales que se recoge en la bibliografía, se obtuvo una cuantía de acero de 24Φ8 por una longitud de 4,3748

m para las dovelas trapezoidales y para las rectangulares 22Φ8, por lo que en la tabla 4 se puede apreciar el peso por metro lineal de dovela.

Tabla 4 Kilogramos de acero por metro lineal de dovela trapezoidal y rectangular

Diámetro	Peso (kg/ml)	Dovela trapezoidal	Dovela rectangular	Peso trapezoidal (Kg/4,3748m)	Peso rectangular (Kg/4,3748 m)	Kg/ml Dovela trapezoidal	Kg/ml Dovela rectangular
Φ8	0,395	24	22	9,48	8,69	2,17	1,99
Φ12	0,888	28	28	11,06	11,06	2,53	2,53
	Total	52	50	20,54	19,75	4,70	4,51

Al tener mayor peso para las dovelas trapezoidales según el análisis, el costo de estas será mayor, por lo que para este indicador no sería viable utilizar las dovelas prefabricadas trapezoidales. Por ejemplo, según datos de proyectos donde se ha podido obtener información, el valor de un anillo sin colocar; es decir, a la salida del acopio, de dimensiones 8400 mm x 1600 mm x 350 mm, es de 9000€ por metro lineal, o sea cada anillo valdría lo que equivale la multiplicación de 9000€ x 1.6 m, es decir, 14400€.

El coste incluye 720€ que se refieren a los accesorios (sellos de impermeabilización o gaskets, packers, barras de guiado, bíconos, pernos, etc.)

A continuación, se indica la cantidad de acero por metro lineal de un anillo en general.

1 m³ de hormigón → 120 Kg de acero

1 anillo → 15,92 m³ de hormigón → 15,92/1.6=9,95 m³/ml

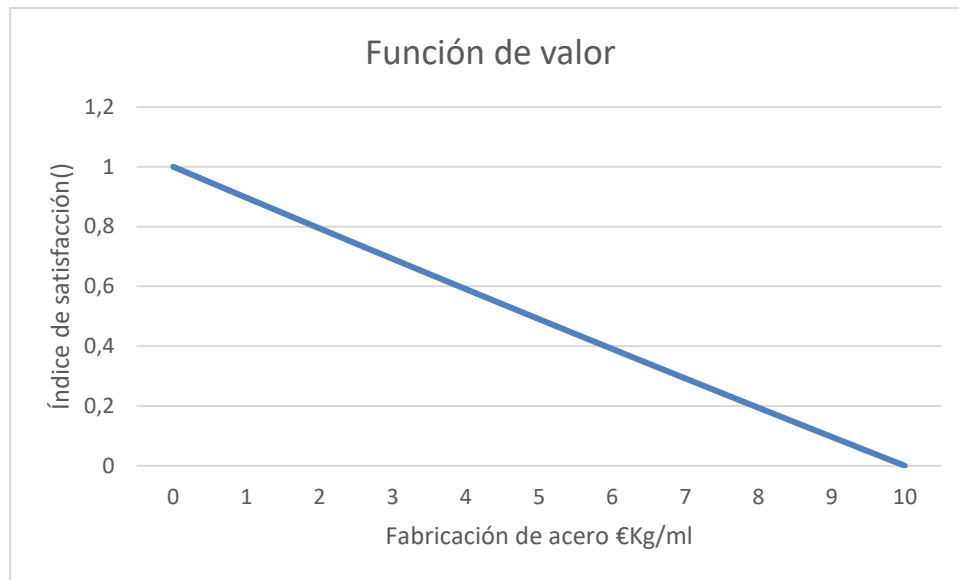
9,95 m³/ml → 1194 Kg/ml

En la siguiente tabla se muestra el valor del acero, pero diferenciando según si se utilizan las dovelas trapezoidales o rectangulares.

Tabla 5 Valor de acero de refuerzo por dovela trapezoidal o rectangular

Descripción	Unidad	Valor unitario (€)	Kg/ml Dovela trapezoidal	Kg/ml Dovela rectangular	Valor total Dovela trapezoidal (€)	Valor total Dovela rectangular (€)
Acero de refuerzo	Kg	1,16	2,17	1,99	5,45	5,24
			2,53	2,53		
		Total	4,70	4,51		

La función de valor es lineal decreciente, ya que se evidencia que la satisfacción se representa linealmente a medida que el coste va creciente, pero es nula mientras el coste del acero en fabricación sea mayor, el valor en euros y la cantidad en Kg/m³ de acero es directamente proporcional ya que a medida que aumente la cantidad de acero, el valor de este aumenta.



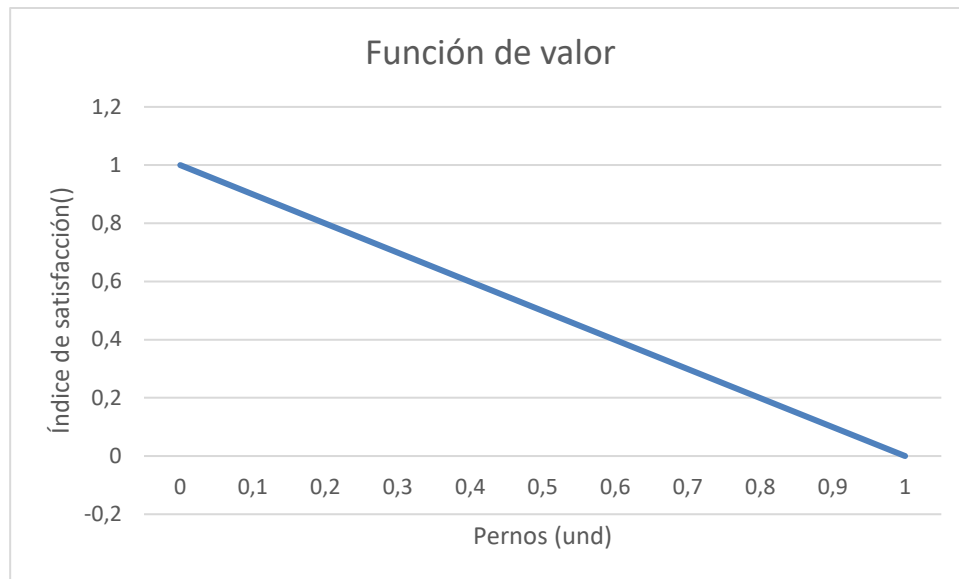
Gráfica 1 Función de valor de costos de la fabricación de acero

5.1.2. Coste directo de pernos junta circunferencial:

La función tiene sentido decreciente; es decir, mientras mayor sea la cantidad de pernos en las dovelas, menor es el índice de satisfacción, teniendo en cuenta la economía. En esta función que tiene forma lineal decreciente y se puede deducir que es una curva discreta, cuando el índice de satisfacción es 1 quiere decir que no se utilizan pernos.

Al tratarse de dovelas trapezoidales, éstas ahorran dinero en accesorios, pero como ya se evaluó anteriormente, aumenta la cantidad de acero, por lo que el valor de la dovola incrementa.

En la función anterior se dio a conocer un valor genérico de un anillo fabricado con dovelas prefabricadas genéricas, es decir que una dovola trapezoidal puede llegar a ahorrarse 720€ de su montaje y fabricación, lo cuál puede ser beneficioso al momento de la construcción y la entrega del proyecto.



Gráfica 2 Función de valor del coste directo de pernos junta circunferencial

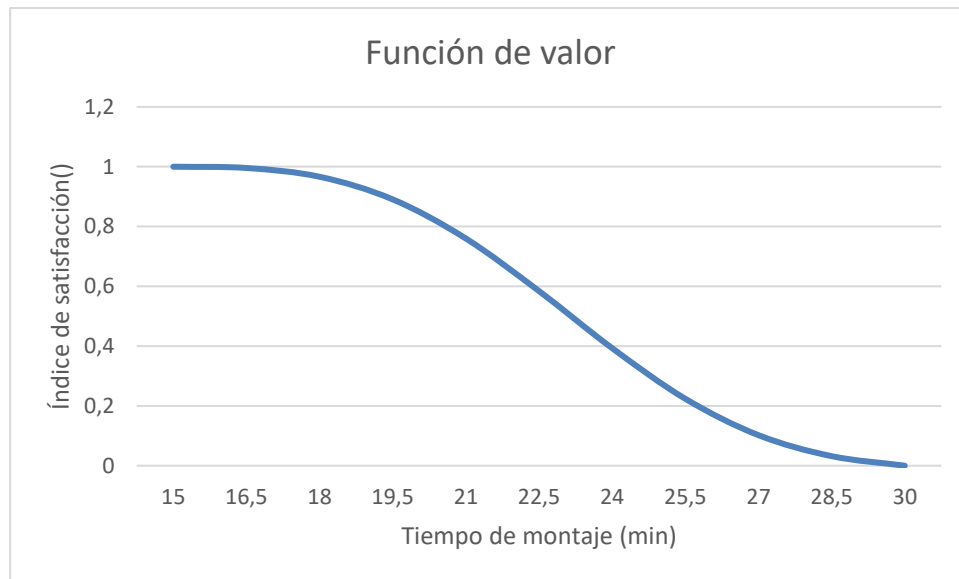
Esta función de valor está escalada, los pernos se cuentan por unidades, normalmente en un anillo se encuentran 19 pernos, la gráfica muestra que a mayor cantidad de pernos menor índice de satisfacción; es decir, si se ponen 19 pernos la satisfacción será nula.

5.1.3. Tiempo de montaje

Este indicador evalúa el tiempo que se dedica en montar cada una de las dovelas, para poder hacer la conformación del anillo. Como se indica en la gráfica el tiempo de montaje por dovela es de 15 a 30 minutos, esta información se obtiene de la experiencia de trabajos de construcción de túneles que han facilitado dichos datos numéricos.

Esta función es descendente, lo que indica que mientras mayor sea el tiempo de montaje de las dovelas, menor es el índice de satisfacción.

Como forma de la función tal cuál como se muestra en la gráfica 3 se ha elegido en forma de "S", debido a que se debe tener un mayor índice de satisfacción, cuando el tiempo de montaje sea entre 15 y 20 minutos aproximadamente, mientras que se debe penalizar, es decir la satisfacción es casi nula mientras el tiempo de montaje esté entre 20 y 30 minutos.



Gráfica 3 Función de valor del tiempo de montaje de dovelas

5.1.4. Frecuencia e importancia de daños:

Esta función de valor evalúa la cantidad de daños que se pueden generar, dependiendo el ángulo de las juntas de las dovelas, es decir si son rectangulares o trapezoidales.

La función de valor que se indica en la gráfica 4 se evidencia que es una curva cóncava decreciente, lo que quiere decir es que mientras menor de 90° sea el ángulo de la junta, es decir si es trapezoidal, el índice de satisfacción es mayor, ya que se genera una minoría de daños, mientras que si el ángulo es recto (90°); es decir, la dovelas rectangulares, el índice de satisfacción es menor y el daño es mayor. Esto gracias a la cantidad de movimientos que se deben realizar para hacer el montaje del anillo completo, como se muestra en las figuras 18 y 19.

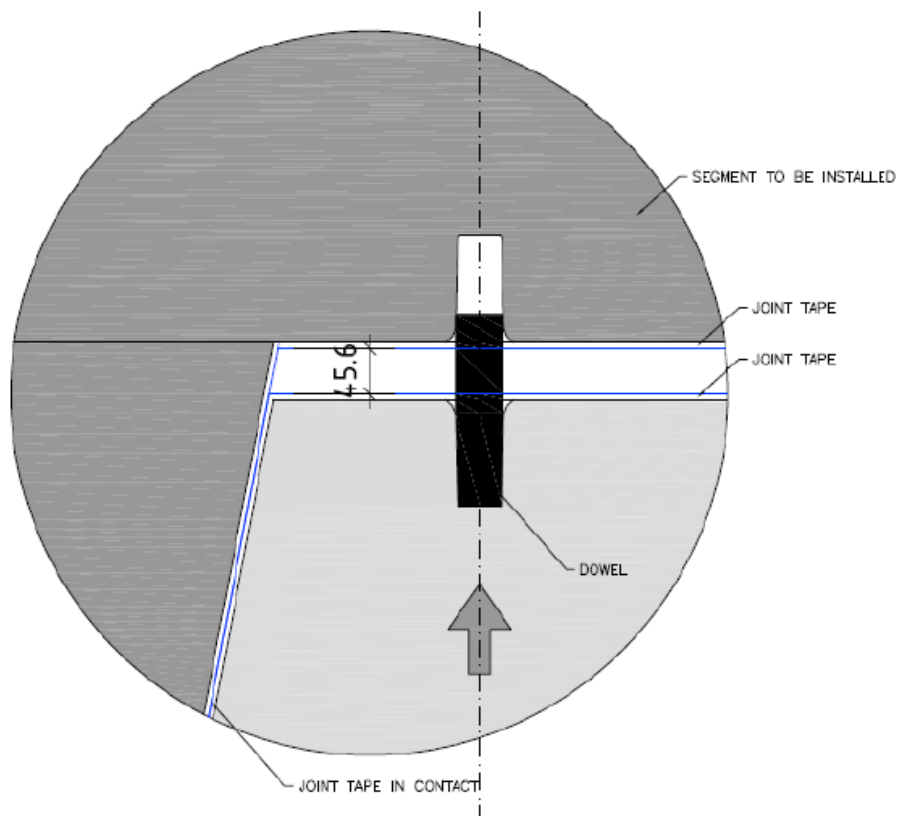


Figura 18 Movimientos doveta trapezoidal(Consult International, 2013)

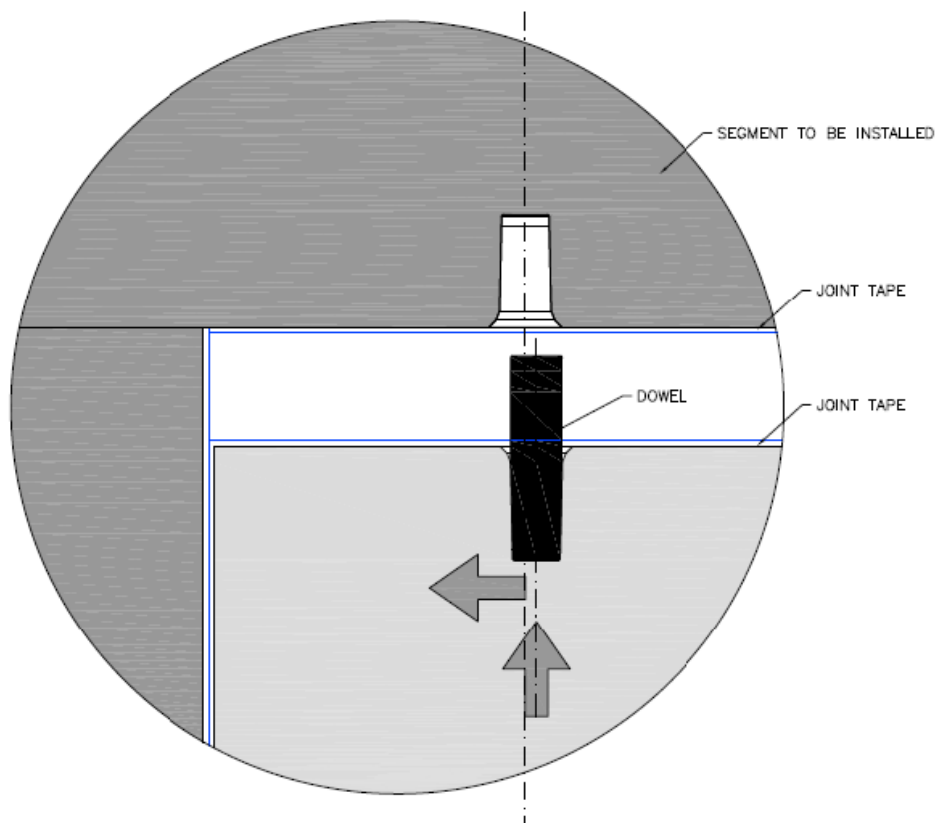
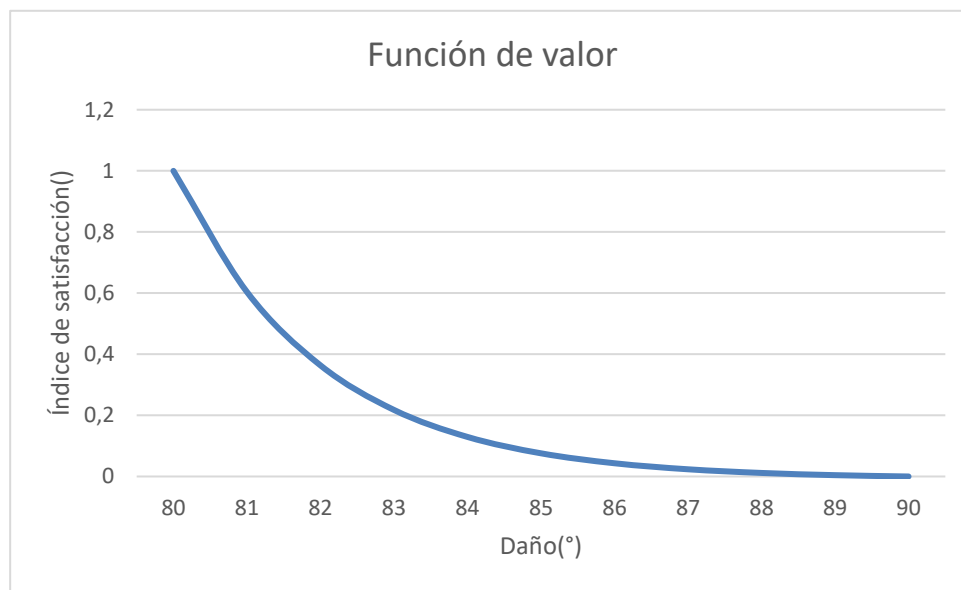


Figura 19 Movimientos para el montaje de dovelas rectangulares



Gráfica 4 Función de valor de la frecuencia e importancia de daños

5.2. Requerimiento medioambiental:

En el requerimiento medioambiental se tratan temas relacionados al entorno natural que se pueda afectar a la hora de construir túneles por la metodología de TBM, por medio de dovelas trapezoidales o rectangulares.

En este requerimiento se evaluarán dos aspectos principales que influyen en la construcción, la pérdida de agua que se pueda generar y también la huella de carbono que se produce por el acero.

Las funciones de valor que hacen parte del requerimiento medioambiental premiarán las alternativas que minimicen el valor del indicador, ya que así se generará una mejoría hacia el entorno natural. Lo cual indica que todas las funciones de valor de este requerimiento tendrán una forma cóncava decreciente, ya que se busca elegir la solución que tenga puntos cercanos a un mayor índice de satisfacción.

5.2.1. Pérdida agua del acuífero:

El indicador de pérdida de agua evidencia la cantidad de agua que se puede llegar a perder al momento de la ejecución del proyecto y también, posteriormente a la misma.

La función de valor tiene forma cóncava decreciente, lo que quiere decir que mientras menos litros de agua se pierdan, el índice de satisfacción es más cercano al valor 1. Según el tipo de dovela presentada, ya sea trapezoidal o rectangular, gracias a la colocación de cada dovela como ya se explicó en el indicador de frecuencia e importancia de daños, de allí se puede relacionar la

pérdida de agua. Si es trapezoidal, se generan menos fracturas por lo que hay menor pérdida de agua, por el contrario, si es rectangular, las fracturas se generan con mayor frecuencia por lo que la pérdida de agua es mayor, esto porque hay mayor movimiento para la colocación de la dovela.

En esta tesina se identifica la construcción por medio de dovelas prefabricadas, lo cual consigue una buena impermeabilización por medio de materiales de sellado comprimidos entre las juntas longitudinales y transversales de las dovelas como se muestra en la figura 20. Actualmente se utilizan inyecciones de bentonita/cemento (figura 21), cemento con latex, resinas en conductos de sellados limitados por las propias dovelas prefabricadas. La inyección de trasdós ayuda a evitar el paso del agua, pero estos túneles también actúan como drenes de los acuíferos que atraviesan. (Sánchez, 2003)

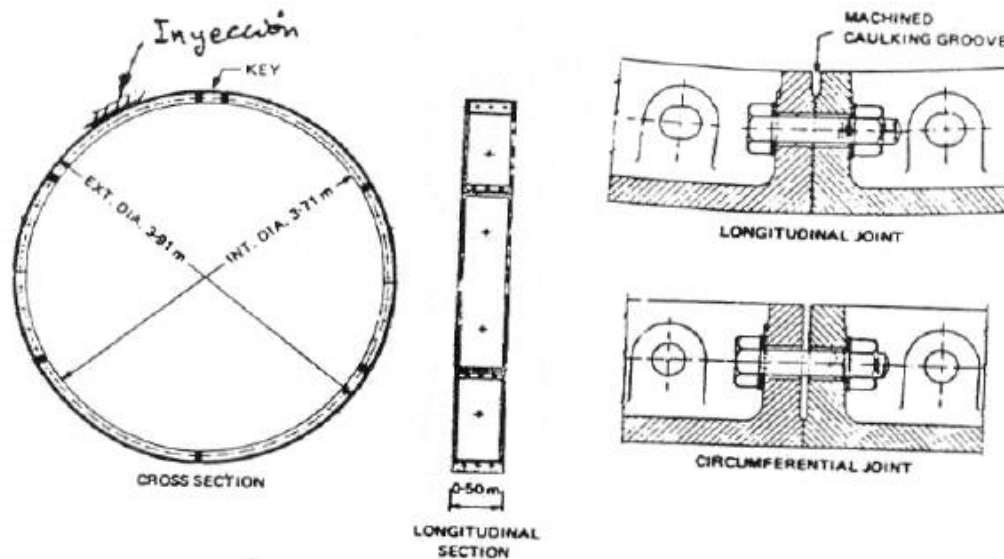


Figura 20 Impermeabilización en túneles contruidos mediante dovelas prefabricadas(Sánchez, 2003)

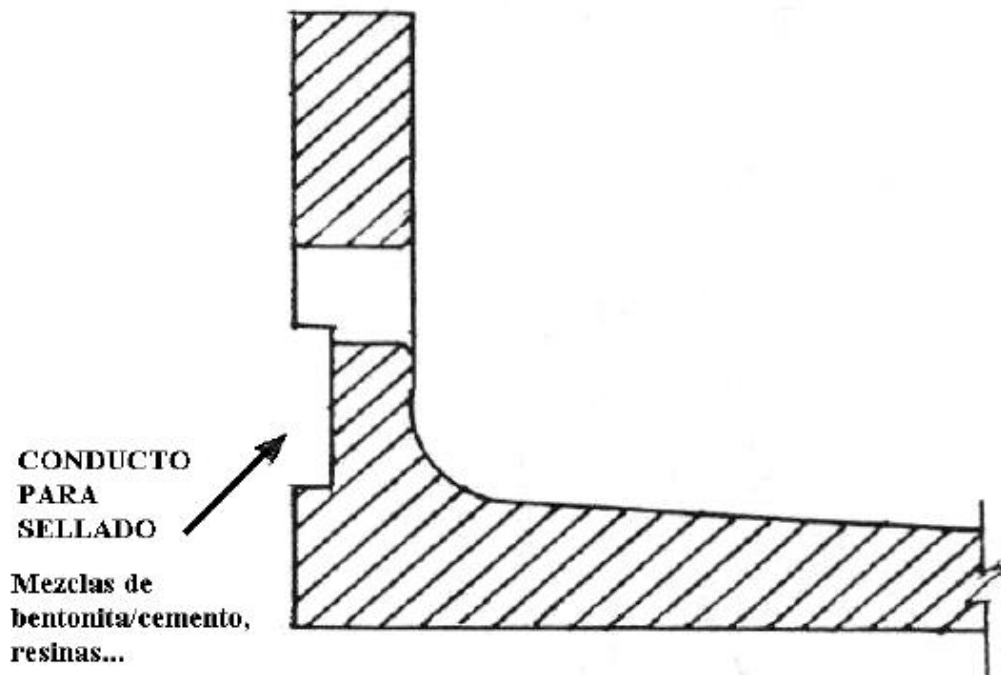
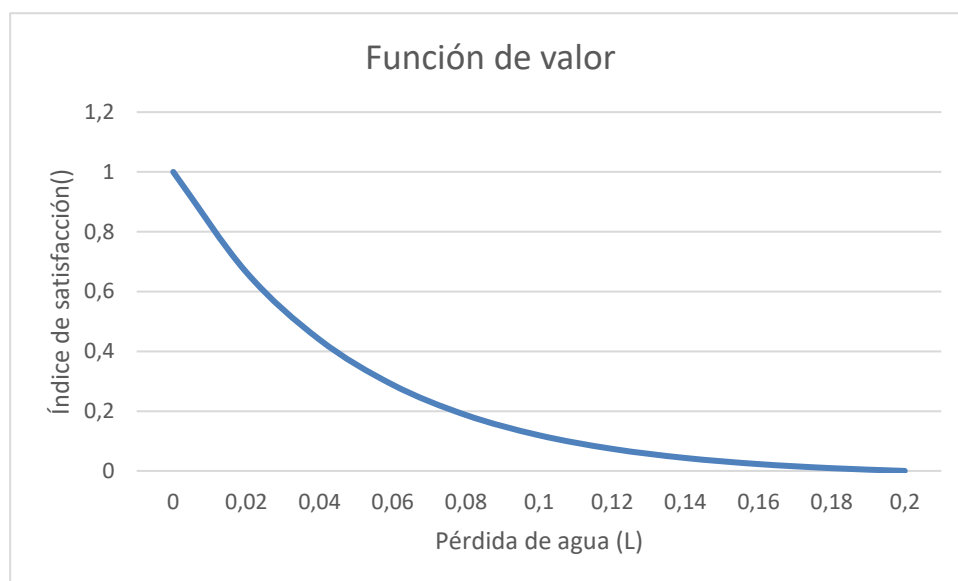


Figura 21 Bentonita/cemento(Sánchez, 2003)



Gráfica 5 Función de valor de la pérdida de agua acuífero

5.2.2. Huella de carbono por refuerzo de acero:

Para la función de valor de la huella de carbono se tuvo en cuenta lo que se muestra en el anejo 1 (Inventory of carbon & Energy, UK), es decir, el inventario de carbono que se puede producir al utilizar un tipo de concreto y, además, el carbono que se puede producir según el acero de refuerzo utilizado.

Para el análisis de este indicador, se tomó el ejemplo de hacer dovelas

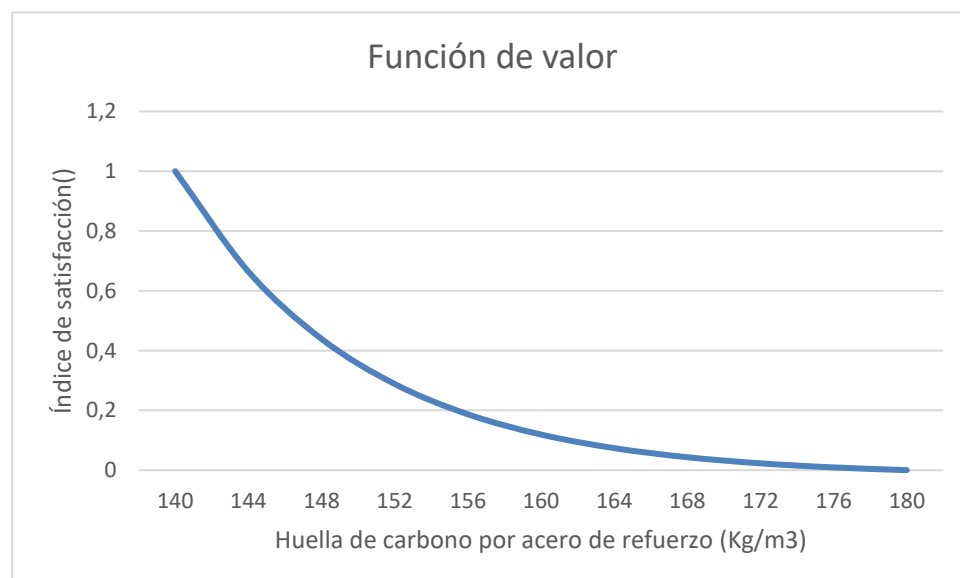
prefabricadas, ambas con el mismo tipo de hormigón C50/60, pero diferenciando la cantidad de refuerzo para las trapezoidales, ya que en esta es mayor la cantidad de acero según la tesina de Sergio Cardozo y en la rectangular la utilización de acero es menor, como se pudo evidenciar en la tabla 4.

En la tabla 6 se puede mostrar las especificaciones de las dovelas y la huella de carbono que ambas puedan producir.

Tabla 6 Huella de carbón generada por hormigón y acero de refuerzo

Tipo de dovela	Hormigón utilizado	Carbón incorporado (KgCO ₂ /kg)	Acero utilizado (Kg/m ³)	Carbón incorporado (KgCO ₂ /kg)	Carbón generado por hormigón (KgCO ₂ /m ³)	Carbón generado por acero (KgCO ₂ /m ³)
Dovela trapezoidal	C50/60	0,21	97,30	1,77	20,63	172,22
Dovela rectangular	C50/60	0,21	89,20	1,77	18,91	157,88

La función de valor tiene una forma cóncava, ya que indica que mientras menos KgCO₂/m³ produzca, el índice de satisfacción incrementa y contrariamente si se produce mayor huella de carbono, el índice de satisfacción tiende a ser 0.



Gráfica 6 Función de valor de huella de carbono por acero de refuerzo

5.3. Requerimiento social:

El requerimiento social indica la problemática o solución que pueda generar cada alternativa, teniendo en cuenta la sociedad que se encuentra implicada en el proyecto.

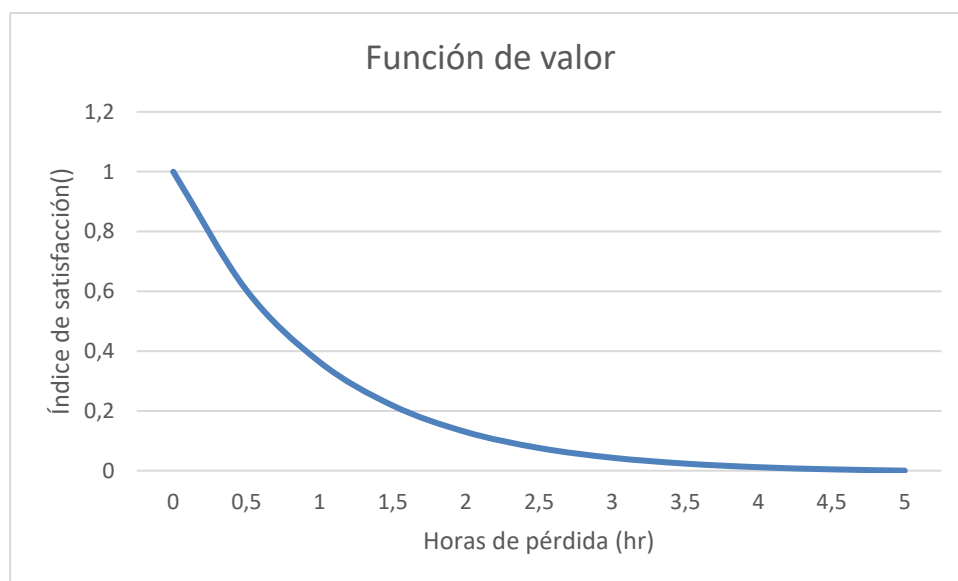
Los indicadores que se evaluarán tienen que ver con la calidad de vida de las personas implicadas en el montaje de las dovelas del túnel, y también la calidad de entrega del proyecto final a sus clientes. Por ende, los indicadores que se evaluarán en este requerimiento son las horas perdidas del montaje de las dovelas y los conflictos que se puedan generar cuando se haga el contrato del proyecto.

Los indicadores tendrán que proporcionar valores que marquen la diferencia entre las alternativas expuestas en la presente tesina.

5.3.1. Horas perdidas de montaje:

Para el presente indicador se tuvo en cuenta la forma de la función de valor cóncava decreciente, lo que significa, que al aumentar las horas de pérdida de montaje de las dovelas ya sean trapezoidales o rectangulares, el índice de satisfacción tiende a ser 0.

Según la maniobra que se realiza para el montaje de las dovelas trapezoidales, se encuentra que es menor el riesgo a producirse accidentes, por lo que se tiene en cuenta, la seguridad de construcción, la calidad, detención del trabajo porque posiblemente se presenten accidentes y la reparación que puede llegar a necesitarse al hacer la ejecución de las dovelas prefabricadas, por ello se evalúa el tiempo perdido por incidentes que se puedan presentar en la ejecución de los anillos.



Gráfica 7 Función de valor de horas perdidas de montaje

5.3.2. Conflictividad durante el contrato:

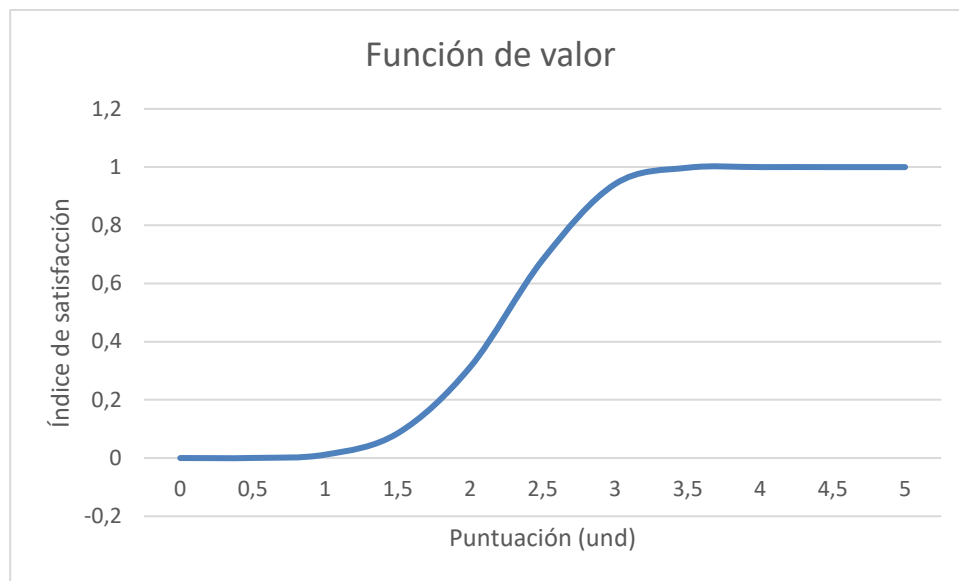
Para la evaluación de este indicador se hace una tabla de puntuación, como la siguiente:

Tabla 7 Puntuación para evaluar la conflictividad durante el contrato

Evaluación	Puntaje
Reprobado	0
Insuficiente	1
Regular	2
Bueno	3
Muy bueno	4
Excelente	5

Donde el cliente evalúa según el resultado total del proyecto realizado, teniendo en cuenta cada uno de los parámetros por los cuales se rige el contrato, evaluando la calidad, el tiempo de entrega, la seguridad de la obra y la economía.

Para la realización de la curva de la función de valor se tuvo en cuenta la puntuación de la tabla, y así, se puede evidenciar la forma de “S” la cuál es creciente, lo que indica que para un valor de puntuación de cero el índice de satisfacción es nulo, y para una puntuación de 5 el índice de satisfacción es uno, para valores intermedios la satisfacción; tal cual como lo indica la gráfica, también está por un valor intermedio de satisfacción.



Gráfica 8 Función de valor de conflictividad durante el contrato

6. CASOS DE ESTUDIO Y RESULTADOS

6.1. INTRODUCCIÓN

Después de obtener el árbol de requerimientos, evaluar los indicadores y analizar las funciones de valor, en este capítulo lo que se hará es evaluar un caso de estudio real, basado en la tesina de Sergio Cardozo, la cual se centra en el cálculo estructural de las dovelas que se evalúan en esta tesina.

La siguiente tabla mostrará los pesos en unidad de porcentaje que se tienen en cuenta para hacer la evaluación de las dos alternativas que se evaluarán según la metodología MIVES.

La tabla 8 muestra la estimación de pesos mencionada anteriormente.

Tabla 8 Estimación de pesos para el árbol de requerimientos

Requerimientos	Criterios	Indicadores
Económicos ($\lambda_{R1}=45\%$)	Costos iniciales de construcción/coste directo/Coste de materiales ($\lambda_{C1}=40\%$)	I1 Coste directo acero en fabricación ($\lambda_{I1}=100\%$)
		I2 Coste directo pernos junta circular ($\lambda_{I2}=100\%$)
	Tiempo de construcción/coste indirecto ($\lambda_{C2}=40\%$)	I3 Tiempo de Montaje ($\lambda_{I3}=100\%$)
	Defectos y daños ($\lambda_{C3}=20\%$)	I4 Frecuencia e importancia daños ($\lambda_{I4}=100\%$)
Medioambiental ($\lambda_{R2}=45\%$)	Afectaciones por entrada de agua ($\lambda_{C4}=40\%$)	I5 Perdida agua del acuífero ($\lambda_{I5}=100\%$)
	Huella de carbono (emisiones, energía) ($\lambda_{C5}=60\%$)	I6 Huella de carbono por refuerzo en acero ($\lambda_{I6}=100\%$)
Social ($\lambda_{R3}=10\%$)	Seguridad y satisfacción en el montaje ($\lambda_{C6}=50\%$)	I7 Horas perdidas en montaje ($\lambda_{I7}=100\%$)
	Daño en reputación con el cliente ($\lambda_{C7}=50\%$)	I8 Conflictividad durante el contrato ($\lambda_{I8}=100\%$)

Según lo anterior, se puede evidenciar que los requerimientos que tienen mayor importancia para hacer la elección según las alternativas son los económicos y medioambientales, ya que cada uno tiene un 45% de peso. Lo que

promueve a tomar la decisión de las dovelas, teniendo en cuenta los costos que puedan ser implicados a la fabricación de estas, observando siempre una mejor calidad de entrega y mejora para el presupuesto de un proyecto. Otro aspecto que es de gran importancia es el medioambiental, ya que se debe tener en cuenta que entre menor contaminación haya hacia el entorno natural, mejor va a ser el resultado del proyecto, pensando para las generaciones futuras que se van a beneficiar de este servicio, como lo son los túneles construidos con dovelas prefabricadas, por medio de TBM.

Las alternativas que se van a evaluar en esta tesina son dos tipos de dovelas, más específicamente detalladas así:

- Alternativa 1 (DPT): Esta alternativa indica la dovela prefabricada trapezoidal.
- Alternativa 2 (DPR): Esta alternativa indica la dovela prefabricada rectangular.

Para proceder al análisis de la sostenibilidad se tiene que hacer unos cálculos previos, los cuales se mostrarán en los anejos, más exactamente el anejo 9.2., ya que fueron sacados de la tesina de Sergio Cardozo.

6.2. EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES:

A continuación, se hará la evaluación de cada uno de los 8 indicadores nombrados anteriormente, para las dos alternativas DPT (Dovela prefabricada Trapezoidal) y DPR (Dovela prefabricada rectangular).

6.2.1. Coste directo del acero en fabricación:

Al comparar la dovela trapezoidal con la dovela rectangular, el coste del hormigón es prácticamente lo mismo, porque, aunque la forma de la trapezoidal es un poco más complicada, los encofrados que se emplean son de alta calidad y no hay una diferencia importante, por lo cuál la diferencia la da el coste del acero. El anillo trapezoidal es un anillo que es más hiperestático, por lo que se deforma menos, pero al mismo tiempo los esfuerzos que da hacen que tenga mayor cantidad de acero y por ello se hace la comparación del coste directo del acero.

Se dice que el acero de una dovela trapezoidal puede ser más costoso, pero al tratarse de un acero que está altamente industrializado, esto no se considera cierto; es decir, la diferencia de costes solamente se identifica por la cantidad de acero considerada.

En este estudio se ha considerado la cuantía de acero correspondiente a los esfuerzos producidos por el terreno, por ejemplo, en las dovelas trapezoidales estos esfuerzos son mayores y por lo tanto el armado es mayor.

No obstante, existe una discusión relacionada sobre si lo que es verdaderamente crítico para dimensionar el armado de una dovela de un túnel construido con tuneladora son dichas cargas de terreno o bien es el empuje de los gatos que proporcionan el avance de la tuneladora, los cuales suelen ser de una gran magnitud y en muchos casos son los que determinan el armado final. En este caso este requerimiento debería ser reestudiado porque seguramente no sería determinante.

Teniendo en cuenta lo anteriormente calculado en la función de valor de este indicador, se pudo evidenciar el coste en euros por Kg/ml y para dar el valor del índice de satisfacción según cada tipo de dovela, se observó el punto en la curva ya encontrada. En la tabla 9 se puede observar la diferencia del valor del acero entre cada dovela prefabricada.

Tabla 9 Índice de satisfacción para coste directo del acero en fabricación

Tipo de dovela	Coste €/Kg/ml	Índice de satisfacción
DPT	5,45	0,55
DPR	5,24	0,57

Según la tabla anterior se puede observar que la alternativa que tiene menor coste es la que tiene mayor índice de satisfacción.

6.2.2. Coste directo de pernos junta circunferencial:

Existe una experiencia en los últimos proyectos donde se han empleado dovelas trapezoidales que lleva a eliminar los pernos en las juntas circunferenciales. En algunos casos, también, el empleo de formas trapezoidales, han llevado a la eliminación de las juntas longitudinales que son oblicuas para dovelas trapezoidales. En este caso y al efecto de este estudio, se ha optado de una manera conservadora a considerar que solamente se eliminan los pernos de las juntas circunferenciales y se reemplazan por otros dispositivos que permiten el encaje de las dovelas. Para esta función de valor se tuvo en cuenta la cantidad de pernos que se debe utilizar en la colocación de las dovelas prefabricadas.

En este indicador se evalúa la cantidad de pernos que se pueden ahorrar según el tipo de dovela que se utilice para hacer los anillos de los túneles. La tabla 10 indica el índice de satisfacción que se puede producir, si se utilizan DPT o DPR, gracias a trabajos de construcción de túneles fabricados con el procedimiento de TBM se ha podido obtener la siguiente información:

Tabla 10 Índice de satisfacción coste directo de pernos junta circunferencial

Tipo de dovela	Pernos (und)	Índice de satisfacción
DPT	0	1,00
DPR	1	0,00

Teniendo en cuenta la tabla anterior el índice de satisfacción es igual a 1 mientras la cantidad de pernos pueda ser ahorrada, es decir sea 0, en cambio, a partir de 1 perno la satisfacción es 0.

6.2.3. Tiempo de montaje:

La obtención del parámetro del tiempo de montaje es un tema muy delicado, ya que tanto clientes como constructores no suelen proporcionar la información de una manera muy fácil. No obstante, los datos que se presentan la tabla 11 corresponden a datos publicados en obras recientes a nivel mundial. De acuerdo con otros estudios, la mejor en el tiempo de montaje se debe a que la dovela se acerca, buscando directamente la junta oblicua y no haciendo movimientos escalonados, derecha-izquierda, adelante-atrás, cuando hay dovelas rectas y al mismo tiempo al ser el ángulo oblicuo, esta maniobra se puede hacer mucho más rápido ya que no hay que tener cuidado con dañar los gaskets, simplemente, porque la dovela nueva va en la posición deseada. (Consult International, 2013)

En este indicador se evaluó el tiempo que se invierte en el montaje de las dovelas prefabricadas, en la tabla 11 se puede observar la diferencia entre las DPT y DPR, ya que como se indicó en la función de valor, se necesita de mayor tiempo para las dovelas rectangulares ya que se debe hacer mayor número de movimientos para encajarlas.

Tabla 11 Índice de satisfacción tiempo de montaje

Tipo de dovela	Tiempo de montaje (min)	Índice de satisfacción
DPT	16	0,997
DPR	23	0,520

Se obtiene un mayor índice de satisfacción en la primera alternativa ya que el tiempo de montaje es menor.

6.2.4. Frecuencia e importancia de daños:

Al ser la maniobra más fácil en las dovelas trapezoidales y requerir menos movimientos, la posibilidad de un golpe o un daño, en el caso de estas dovelas

es menor.

Para evaluar la frecuencia e importancia de daños se debió tener en cuenta el indicador anterior (tiempo de montaje) ya que en éste se observaron detalladamente los movimientos que se deben invertir al momento de construir con dovelas prefabricadas trapezoidales o rectangulares. En la tabla 12 se puede apreciar el ángulo de inclinación con el cual se pueden generar los daños en un tipo de dovela u otro.

Tabla 12 Índice de satisfacción frecuencia e importancia de daños

Tipo de dovela	Ángulo de inclinación de la dovela (°)	Índice de satisfacción
DPT	80,5	0,80
DPR	90	0,00

Según la tabla anterior mientras más recto sea el ángulo de la dovela el índice de satisfacción tiende a ser 0.

6.2.5. Pérdida de agua acuífero:

Existe un riesgo mayor de daños a los gaskets o sellos de impermeabilización que se colocan entre dovelas ya que son de goma con lo cual les cuesta deslizar uno sobre otro, en la dovela rectangular existe un momento en el que tienen que deslizar, en cambio en la dovela trapezoidal, esto es mucho más difícil que ocurra, entonces, si la dovela no desliza perfectamente, lo cual es altamente posible en las dovelas rectangulares, los gaskets se pueden desgarrar o arrancar, y esto puede producir problemas de pérdida de agua. En consecuencia y a la luz de algunos incidentes ocurridos recientemente en España y otros países, la importancia de la pérdida de agua en el acuífero es un impacto ambiental, más que relacionado con las molestias interiores para la operación del túnel.

Un ejemplo son los túneles de Pajares, la obra más costosa de AVE, la cual produjo desvíos de agua desde León a Asturias, ha secado acuíferos y desviado cauces. Las dovelas no eran perfectamente impermeables ya que los gaskets fallaron, por lo que la cuenca del Duero pierde gran cantidad de agua, la cual abastecía unas 30 ciudades que tienen la magnitud de León. Los estudios de hidrogeológicos se hicieron cuando la obra ya había iniciado, por lo que al hacer las perforaciones se encontraban con bolsas de agua que pinchaban y producían cantidad de filtraciones como se muestra en la figura 22. (Sevillano, 2017).



Figura 22 Filtración de agua en túnel de Pajares (Sevillano, 2017)

En la tabla 13 se indican los valores en L/min/m² de revestimiento que se pierden según el tipo de dovela puesto en el anillo.

Tabla 13 Índice de satisfacción pérdida de agua acuífero

Tipo de dovela	Pérdida de agua (L/min/m ²)	Índice de satisfacción
DPT	0	1,00
DPR	0,2	0,00

Teniendo en cuenta la tabla anterior la primera alternativa es la que mayor índice de satisfacción produce.

6.2.6. Huella de carbono por refuerzo de acero:

En este indicador se obtuvo el valor de la huella de carbono que se puede generar dependiendo del tipo de dovela que se utilice, en indicador de costos del acero se evidencia que es mayor la cantidad de acero que se utiliza en las dovelas trapezoidales, por ende, la generación de huella de carbono es directamente proporcional a la cantidad de acero, es decir, hay mayor

contaminación. En la tabla 14 se observa detalladamente la generación de huella de carbono para cada alternativa.

Tabla 14 Índice de satisfacción huella de carbono por refuerzo de acero

Tipo de dovela	Huella de carbono por acero de refuerzo (KgCO ₂ /m ³)	Índice de satisfacción
DPT	172,22	0,02
DPR	157,88	0,16

Según la tabla anterior se evidencia que la segunda alternativa genera un mayor índice de satisfacción ya que es menor la cantidad de huella de carbono que produce.

6.2.7. Horas perdidas de montaje:

Al ser una maniobra más segura y con menos riesgos, las horas perdidas por temas de seguridad, calidad, reparación, incidentes en el montaje, haciendo comparación entre los dos tipos de dovelas a evaluar, en la tabla 15 se especifica el tiempo que se puede llegar a perder en por incidentes ocurridos en la ejecución de las dovelas.

Tabla 15 Índice de satisfacción para horas de pérdida de montaje

Tipo de dovela	Tiempo perdido de montaje (hr)	Índice de satisfacción
DPT	1	0,36
DPR	5	0,00

Según la tabla anterior la primera alternativa (DPT) pierde menor tiempo en su montaje que la segunda (DPR), por ende, el índice de satisfacción para la DPR es menor, por su mayor demora.

6.2.8. Conflictividad durante el contrato:

Al tratarse de una solución que da menor cantidad de problemas el ambiente general del contrato mejora, es decir, si los clientes, las direcciones facultativas, observan que la calidad mejora, que ocurren menos incidentes, que las dovelas se colocan más rápido, que haya menor frecuencia de daños, contribuye a que haya un buen acuerdo en el proyecto y que el contratista y el cliente estén alineados con los objetivos, lo cual se traduce en mejor calidad de entrega, menor plazo de entrega, mayor satisfacción económica y mayor seguridad de construcción. Para este indicador se tuvo en cuenta una escala de

puntuación, la cual se genera del cliente que recibe el proyecto, la tabla 16 muestra la satisfacción e insatisfacción según las condiciones del contrato, ya sea de DPT o DPR.

Tabla 16 Índice de satisfacción conflictividad durante el contrato

Tipo de dovela	Puntaje (und)	Índice de satisfacción
DPT	5	1,00
DPR	3	0,94

Según la tabla anterior se tuvo mayor índice de satisfacción con la alternativa de la dovela prefabricada trapezoidal.

6.3. EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS:

6.3.1. Valor de los indicadores:

En la tabla 17 se hace un resumen de los valores obtenidos de índice de satisfacción de cada indicador.

Tabla 17 Índice de satisfacción por indicador

Indicador	DPT	DPV
I1 Coste directo acero en fabricación	0,55	0,57
I2 Coste directo pernos junta circunferencial	1,00	0,00
I3 Tiempo de Montaje	0,997	0,520
I4 Frecuencia e importancia daños	0,80	0,00
I5 Perdida agua del acuífero	1,00	0,00
I6 Huella de carbono por refuerzo en acero	0,02	0,16
I7 Horas perdidas en montaje	0,36	0,00
I8 Conflictividad durante el contrato	1,00	0,94

6.3.2. Valor de los criterios:

Aplicando la ecuación 11 que se encuentra en el capítulo 3.1.4. se pueden conocer los valores de los criterios del árbol de requerimientos. La tabla 18 muestra el valor que se le da a cada criterio según el porcentaje dado a cada requerimiento (figura 19)



Figura 23 Porcentajes de requerimientos

Tabla 18 Valor de criterios

Criterios	DPT	DPR
Costos iniciales de construcción/coste directo/Coste de materiales ($\lambda_{C1}=40\%$)	1,550	0,570
Tiempo de construcción/coste indirecto ($\lambda_{C2}=40\%$)	0,997	0,520
Defectos y daños ($\lambda_{C3}=20\%$)	0,800	0,000
Afectaciones por entrada de agua ($\lambda_{C4}=40\%$)	1,000	0,000
Huella de carbono (emisiones, energía) ($\lambda_{C5}=60\%$)	0,020	0,160
Seguridad y satisfacción en el montaje ($\lambda_{C6}=50\%$)	0,360	0,000
Daño en reputación con el cliente ($\lambda_{C7}=50\%$)	1,000	0,940

6.3.3. Valor de los requerimientos:

Aplicando la ecuación 12 que se encuentra en el capítulo 3.1.4. se obtienen los valores de los requerimientos. La tabla 19 muestra el valor dado a cada requerimiento, teniendo en cuenta los mismos porcentajes de la figura 19.

Tabla 19 Valor de requerimientos

Requerimiento	DPT	DPR
Requerimiento Económico	1,179	0,436
Requerimiento Medioambiental	0,412	0,096
Requerimiento Social	0,680	0,470

Para hacer el valor del índice de sostenibilidad total, se hace la sumatoria de los valores de cada requerimiento multiplicados por el porcentaje dado en la figura 19, quedando el índice de sostenibilidad evidenciado en la table 20.

Tabla 20 Índice de sostenibilidad total

Is	DPT	DPR
Índice de sostenibilidad total	0,784	0,286

De la tabla anterior se puede concluir que el índice de sostenibilidad mayor lo produce la dovela prefabricada trapezoidal (DPT).

6.3.4. Estudios de sensibilidad:

Al objeto de ver la variación que puede tener el índice de sostenibilidad con respecto a los pesos que se les asignen, se ha modificado el análisis, dando mayor peso al requerimiento económico o medioambiental.

Se puede realizar el análisis poniendo mayor peso al requerimiento económico, mirándolo desde el punto de vista empresarial, es decir, lo que más le conviene a la constructora para mejorar su economía. La figura 20 muestra la nueva distribución de pesos en los requerimientos.

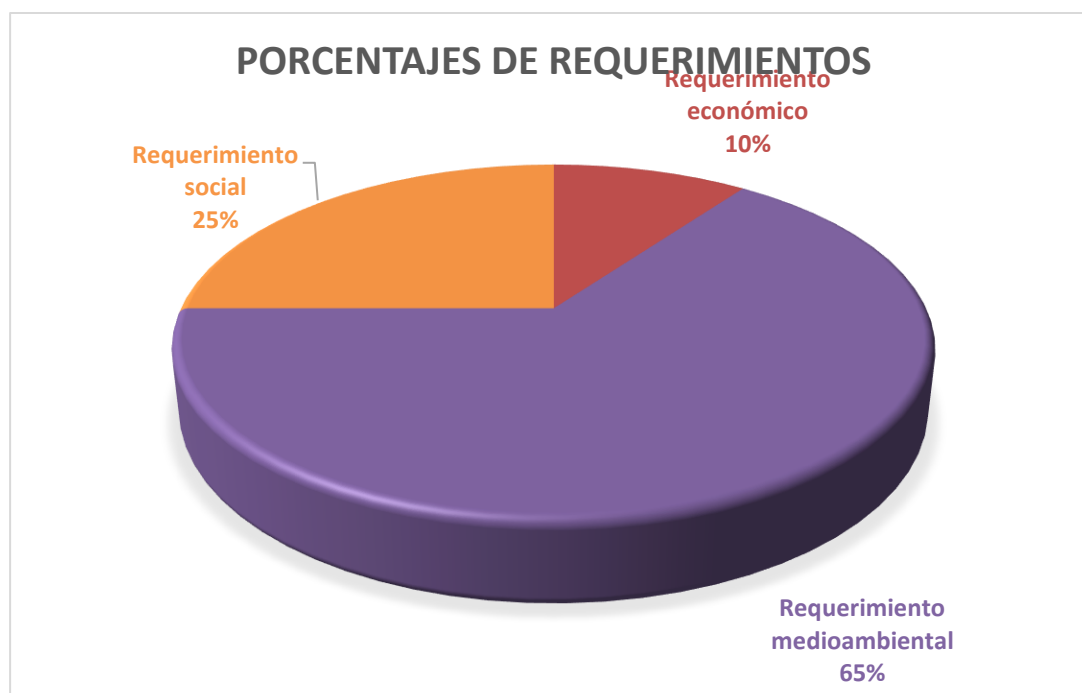


Figura 24 Porcentaje de requerimientos perspectiva económica

La tabla 21 muestra el nuevo índice de sostenibilidad que se genera con los porcentajes beneficiando principalmente el requerimiento económico.

Tabla 21 Índice de sostenibilidad perspectiva económica

Is	DPT	DPR
Índice de sostenibilidad total	0,899	0,337

Otro ejemplo se puede hacer beneficiando el requerimiento social y el medioambiental, es decir, pensar primero en la satisfacción del cliente y en el entorno natural antes que en la economía. La figura 21 muestra la nueva distribución de pesos de los requerimientos.



Figura 25 Porcentajes de requerimiento beneficiando el social y el medioambiental

La tabla 22 muestra el resultado del nuevo índice de sostenibilidad al aplicar esta distribución de pesos en los requerimientos.

Tabla 22 Índice de sostenibilidad beneficiando el requerimiento medioambiental y social

Is	DPT	DPR
Índice de sostenibilidad total	0,556	0,224

De los análisis anteriores se puede concluir que la dovela que se debe utilizar al realizar un proyecto con la metodología TBM son las dovelas prefabricadas trapezoidales, ya que sin importar el peso que se le de a cualquier requerimiento, se evidencia que siempre va a sacar un mayor índice de sostenibilidad.

7. CONCLUSIONES

7.1. Introducción:

En este capítulo se muestran las conclusiones generales y específicas obtenidas de la metodología y el desarrollo aplicados en la presente tesina. Las conclusiones generales responden al objetivo principal y las específicas se van desarrollando a lo largo de la realización de este trabajo.

7.2. Conclusiones generales:

En la presente tesina se aplicó la metodología MIVES para evaluar la sostenibilidad de las dovelas prefabricadas, detallando por requerimientos económicos, medioambientales y sociales. El objetivo principal es evaluar los beneficios y desventajas que se generan al aplicar la metodología de construcción de túneles con TBM, con dos alternativas de dovelas prefabricadas.

Las dos alternativas evaluadas son las dovelas prefabricadas trapezoidales y las dovelas prefabricadas rectangulares. De la aplicación de la metodología MIVES se puede concluir que:

- El procedimiento que se lleva a cabo en la metodología permite hacer comparaciones entre distintos indicadores, sin importar la unidad de medida en la que se encuentre.
- Según los resultados obtenidos en el análisis las dovelas prefabricadas trapezoidales son más sostenibles teniendo en cuenta los indicadores evaluados en la presente tesina.
- Se concluye que el índice de sostenibilidad I_s siempre es mayor en las dovelas prefabricadas trapezoidales, sin importar, la distribución de pesos de los requerimientos, por ende, para la construcción siempre va a ser mejor valorada la DPT.

7.3. Conclusiones específicas:

Del análisis realizado en la presente tesina se pueden hacer las siguientes conclusiones específicas:

- Para hacer la evaluación de la sostenibilidad se tuvieron en cuenta varios indicadores, descartando los de menor relevancia para la construcción de túneles con dovelas prefabricadas.
- Al analizar los indicadores del requerimiento económico, se concluyó que tanto para el cliente como para la empresa es importante tener en cuenta el costo del acero, ya que según este costo el valor de la dovela aumenta o disminuye, dependiendo de

la cantidad de acero de refuerzo que se utilice.

- Desde el punto de vista económico, el tiempo de montaje de las dovelas tiene gran valor, ya que dependiendo de este se aumenta o se disminuye el tiempo para entregar la obra y los costos que puedan implicar esto.
- Para el requerimiento medioambiental, los dos indicadores que se evaluaron son importantes para realizar un proyecto con este tipo de dovelas, es decir, la pérdida de agua y la huella de carbono que pueda generar el acero de refuerzo. Si la dovela tiene mayor acero de refuerzo, la producción de huella de carbono va a ser mayor, por lo que en este caso la dovela trapezoidal no sería la más indicada.
- En el requerimiento social se evidencia que el cliente se beneficia tanto para el tiempo de pérdida por montajes y también en el cumplimiento con el contrato, ya que los tiempos de demora de fabricación de los anillos de la dovela prefabricada trapezoidal son menores por menor cantidad de movimientos para su anclaje.

8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En base a lo concluido se abre un camino para futuras líneas de investigación en cuanto a las dovelas prefabricadas trapezoidales.

Existen estudios de investigación en cuanto al cálculo estructural de las dovelas trapezoidales basado en el acero estructural, pero podría llegar a importar la cantidad de hormigón que se utiliza al hacer comparaciones con otro tipo de dovelas. Esto puede ayudar a hacer más evaluaciones de tipo sostenible para la aplicación de las DPT.

Para generar mayor índice de sostenibilidad, se podría investigar sobre la utilización de nuevos materiales para la fabricación de dovelas, ya que este tema de los materiales está en auge para la construcción, por ejemplo, materiales reciclables, como el papel.

Actualmente se hace la aplicación de las DPT para la construcción de túneles, pero haciendo cambios en sus materiales y con ayuda de la metodología planteada en esta tesina se puede hacer la evaluación del índice de sostenibilidad en otros aspectos, pero también haciendo la aplicación de este tipo de dovelas.

Debe de profundizarse en los estudios de sensibilidad con respecto a los pesos, que si bien, en el caso del presente trabajo, arrojan conclusiones muy claras, puede existir el caso que en otras circunstancias los resultados sean diversos.

Existen muchos requerimientos sobre los cuales no hay conclusiones completas (el comportamiento de las dovelas trapezoidales y rectangulares frente a la impermeabilidad, es decir, los sellos que evitan la entrada del agua, la velocidad de ejecución de las dovelas, la calidad de los acabados, entre otros).

9. BIBLIOGRAFÍA

- Aguado de Cea, A., Josa García-Tornel, A., & Alavedra Ribot, P. (2006). *Modelo Integrado de Valor de Edificios Sostenibles (MIVES)*.
- Alarcón, D. B. (2005). Modelo integrado de valor para estructuras sostenibles, 285.
- Arnau, O., & Molins, C. (2012). Three dimensional structural response of segmental tunnel linings. *Engineering Structures*, 44, 210-221. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.001>
- Cardozo, S. (2019). Ventajas estructurales del uso de dovelas trapezoidales frente a rectangulares en túneles ejecutados con TBM.
- Chen, Y., Okudan, G. E., & Riley, D. R. (2010). Sustainable performance criteria for construction method selection in concrete buildings. *Automation in Construction*, 19(2), 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.10.004>
- Consult International, D. (2013). SUBURBAN METRO CARACAS SEGMENTAL LINING CONCEPT, (May).
- Della, Nicola & Castellvi, H. (2016). Diseño de túneles con tuneladora.
- Díaz Querol, J. Ma. (2016). MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ALTERNATIVAS DE REFUERZO PARA DOVELAS DE TÚNELES EJECUTADOS CON TBM.
- Domoterra. (2016). La huella de carbono y los proyectos de construcción.
- FCC Construcción S.A. (1993). Utilización de tbm en excavación de túneles.
- Gallopín, G. (2003). *Sostenibilidad y desarrollo Sostenible: un enfoque sistémico C E P R L División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos. Publicación de las Naciones Unidas*. Recuperado de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5763/S033120_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Morales, C. (2012). Maquinas de tbm para tuneles.
- Perri, G. (2014). Sistemas constructivos para Metros : Túneles excavados con TBMs.
- Revestimientos de dovelas prefabricadas. (2016).
- Sánchez, M. (2003). Drenaje E Impermeabilización Durante La Construcción Y Explotación De Túneles, 1-37.
- Sevillano, E. (2017). Medio Ambiente multa a Adif por provocar un desvío de agua con los túneles de Pajares.
- Spencer, M. (2009). Tunnel boring machines. Trends in design and construction of mechanized tunnelling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 30(4), 237-237. <https://doi.org/10.1007/BF01045720>
- Tuneladora de doble escudo - ø 2. (s. f.).

Yang, Y. H., & Ren, B. B. (2015). BIM Based Green Building Management Development in the U.S. *Applied Mechanics and Materials*, 744(1), 1597. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.744-746.1597>

10. ANEJOS

10.1. FICHAS TÉCNICAS DEL ICE (INVENTORY OF CARBON AND ENERGY, UK)

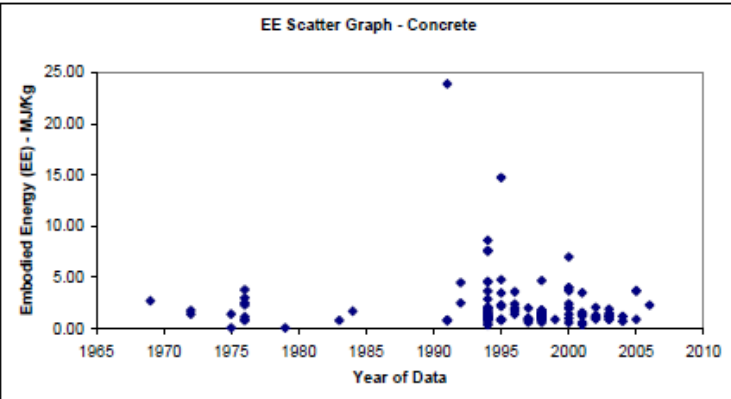
10.1.1.Concreto

Material Profile: Concrete								
Embodied Energy (EE) Database Statistics - MJ/Kg								
Main Material	No. Records	Average EE		Standard Deviation	Minimum EE		Maximum EE	Comments on the Database Statistics:
Concrete	122	2.91		8.68	0.07		92.50	None
Concrete, General	112	3.01		9.07	0.07		92.50	
Unspecified	85	2.12		2.85	0.07		23.90	
Virgin	27	6.02		18.24	0.59		92.50	
Concrete, Pre-Cast	10	1.89		0.43	1.20		2.72	
Unspecified	6	2.01		0.43	1.36		2.72	
Virgin	4	1.72		0.42	1.20		2.19	
Selected Embodied Energy & Carbon Values and Associated Data								
Boundaries	Cradle to Gate			Data Range	(+/- 30%)		Specific Comments	
Material	Embodied Energy - MJ/Kg			Embodied Carbon - Kg CO2/Kg				
General Concrete	0.95			0.130			Selection of a specific concrete type will give greater accuracy, please see comments	
1:1:2 Cement:Sand:Aggregate	1.39			0.209			(High strength)	
1:1.5:3	1.11			0.159			(used in floor slab, columns & load bearing structure)	
1:2:4	0.95			0.129			(Typical in construction of buildings under 3 storeys)	
1:2.5:5	0.84			0.109				
1:3:6	0.77			0.096			(non-structural mass concrete)	
1:4:8	0.69			0.080				

REINFORCED CONCRETE (ICE CMC Model Values)			
For reinforcement add to selected coefficient for each 25kg steel reinforcement	0.26	0.018	For each 25 kg Steel per m3 concrete
EXAMPLE: Reinforced RC30 (See Below) with 100kg Rebar	2.12 (1.08 + 0.26 * 4)	0.241 (0.153 + 0.018 *4)	
CONCRETE BLOCKS (ICE CMC Model Values)			
Block - 8 MPa Compressive Strength	s	0.061	Estimated from the concrete block mix proportions with a small allowance added for concrete block curing.
Block - 10 MPa	0.67	0.074	
Block -12 MPa	0.71	0.080	
Block -13 MPa	0.81	0.098	
Autoclaved Aerated Blocks (AAC's)	3.50	0.28 to 0.375	Not ICE CMC model results
MISCELLANEOUS VALUES			
Prefabricated Concrete	2.00	0.215	
Fibre-Reinforced	7.75	0.450	
Concrete Road & Pavement	1.24	0.127	
EXAMPLE Road	2,085 MJ/Sqm	187.7 KgCO2/Sqm	
Wood-Wool Reinforced	2.08	-	Reference 12
ALTERNATIVE CONCRETE MIXES (ICE Cement, Mortar & Concrete Model Results)			
BS 8500:2006 SPECIFICATIONS			
Material	Embodied Energy - MJ/kg	Embodied Carbon - kgCO2/kg	NOTE: Cradle to Gate

FLY ASH							
% Cement Replacement - Fly Ash	0%	25%	50%	0%	25%	50%	Note 0% is a standard concrete
GEN 0	0.64	0.57	0.50	0.071	0.058	0.046	Compressive Strength C8/8 MPa
GEN 1	0.77	0.66	0.56	0.095	0.077	0.058	C8/10; Possible uses: mass Concrete, mass fill, mass foundations
GEN 2	0.81	0.70	0.58	0.103	0.083	0.062	C12/15
GEN 3	0.85	0.73	0.60	0.112	0.089	0.066	C16/20
RC20	0.95	0.80	0.65	0.128	0.102	0.075	C20/25
RC25	0.99	0.83	0.67	0.136	0.108	0.079	C25/30
RC30	1.08	0.90	0.72	0.153	0.120	0.087	C30/37; Possible uses: foundations
RC35	1.13	0.94	0.74	0.161	0.126	0.091	C35/45; Possible uses: ground floors
RC40	1.17	0.97	0.77	0.169	0.132	0.096	C40/50; Possible uses: structural purposes, in situ floors, walls, superstructure
RC50	1.41	1.15	0.88	0.212	0.165	0.117	C50
PAV1	1.04	0.87	0.70	0.145	0.114	0.083	C25/30
PAV2	1.08	0.90	0.72	0.153	0.120	0.087	C28/35

GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG							
% Cement Replacement - Blast Furnace Slag	0%	25%	50%	0%	25%	50%	Note 0% is a standard concrete
GEN 0	0.64	0.59	0.54	0.071	0.059	0.048	Compressive Strength C6/8 MPa
GEN 1	0.77	0.69	0.62	0.095	0.078	0.061	C8/10; Possible uses: mass Concrete, mass fill, mass foundations
GEN 2	0.81	0.70	0.65	0.103	0.083	0.065	C12/15
GEN 3	0.85	0.76	0.67	0.112	0.091	0.070	C16/20
RC20	0.95	0.84	0.73	0.128	0.103	0.079	C20/25
RC25	0.99	0.88	0.76	0.136	0.110	0.083	C25/30
RC30	1.08	0.95	0.82	0.153	0.122	0.092	C30/37; Possible uses: foundations
RC35	1.13	0.99	0.85	0.161	0.129	0.096	C35/45; Possible uses: ground floors
RC40	1.17	1.03	0.88	0.169	0.135	0.101	C40/50; Possible uses: structural purposes, in situ floors, walls, superstructure
RC50	1.41	1.22	1.03	0.212	0.168	0.124	C50
PAV1	1.04	0.91	0.79	0.145	0.116	0.088	C25/30
PAV2	1.08	0.95	0.82	0.153	0.122	0.092	C28/35

COMMENT ON ABOVE DATA STRUCTURE																										
<p>The first column represents standard concrete created with 100% Portland cement. The other columns are based on a direct substitution of fly ash or blast furnace slag in place of cement. They have been modelled on the fraction of cement replacement material (fly ash or slag). However there are thresholds on the upper limit that each of these replacement materials can contribute. This threshold is thought to be linked to the strength class of the concrete. It is understood that fly ash, which has a lower embodied energy and carbon, has a lower threshold than for blast furnace slag. This implies that less fly ash can be used for a particular concrete mix. In certain circumstances blast furnace slag could reach 70-80% replacement, this is much higher than the upper limits of fly ash. The ICE Cement, Mortar & Concrete Model was used to estimate these values. It was assumed that there will be no changes in the quantities of water, aggregates or plasticiser/additives due to the use of cementitious replacement materials. The above data is offered as a what if guideline only. The data user must ensure that any quantity of cement substitution is suitable for the specific application.</p>																										
Comments	<p>The values of embodied carbon all exclude re-carbonation of concrete in use, which is application dependent. The majority of these concrete values were taken from the University of Bath's ICE Cement, Mortar and Concrete Model. It operates using the quantities of constituent material inputs. As a result these values are dependent upon the selected coefficients of embodied energy and carbon of cement, sand and aggregates, which are the main constituent materials for concrete. The values of embodied energy and carbon produced by this model are in good agreement with values quoted in the literature. It may appear that concrete has a confusing array of options but it is worth determining the strength class or preferably mix of concrete (particularly cement content) used in a project. If none of the descriptions or comments above help then you may wish to apply the above general value, which is for a typical concrete mix. But in doing so (and in an extreme case) you may inadvertently add up to +/-50% additional error bars to your concrete results. Please note the suggested possible uses of each strength class of concrete is a rough guide only, this does depend upon the building type and height.</p>																									
Material Scatter Graph		Fuel Split & Embodied Carbon Data																								
		<table> <tr> <th>Energy source</th><th>% of Embodied Energy from energy source</th><th>% of embodied carbon from energy source</th></tr> <tr> <td>Coal</td><td>47.1%</td><td>26.1%</td></tr> <tr> <td>LPG</td><td>0.0%</td><td>0.0%</td></tr> <tr> <td>Oil</td><td>15.4%</td><td>8.0%</td></tr> <tr> <td>Natural gas</td><td>3.1%</td><td>1.2%</td></tr> <tr> <td>Electricity</td><td>34.4%</td><td>12.9%</td></tr> <tr> <td>Other</td><td>0.0%</td><td>51.8% (Non-fuel emission)</td></tr> <tr> <td>Total</td><td>0.0%</td><td>100.0%</td></tr> </table> <p>Fuel Split & Embodied Carbon Comments:</p> <p>This fuel mix was estimated based on the fuel mix of the constituent materials for concrete, including aggregates, sand and cement. The non-fuel related emissions are from the manufacture of cement and constitute a large proportion of the carbon emissions.</p>	Energy source	% of Embodied Energy from energy source	% of embodied carbon from energy source	Coal	47.1%	26.1%	LPG	0.0%	0.0%	Oil	15.4%	8.0%	Natural gas	3.1%	1.2%	Electricity	34.4%	12.9%	Other	0.0%	51.8% (Non-fuel emission)	Total	0.0%	100.0%
Energy source	% of Embodied Energy from energy source	% of embodied carbon from energy source																								
Coal	47.1%	26.1%																								
LPG	0.0%	0.0%																								
Oil	15.4%	8.0%																								
Natural gas	3.1%	1.2%																								
Electricity	34.4%	12.9%																								
Other	0.0%	51.8% (Non-fuel emission)																								
Total	0.0%	100.0%																								

Material Properties (CIBSE Data) for Concrete					
Material	Condition	Thermal conductivity (W-m ⁻¹ K ⁻¹)	Density (kg m ⁻³)	Specific heat (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Thermal Diffusivity (M ² S ⁻¹)
Concrete blocks/tiles					
block, aerated		0.24	750	1000	0.0000032
block, heavyweight, 300mm		1.31	2240	840	6.96218E-07
block, lightweight, 150mm		0.66	1780	840	4.46429E-07
block, lightweight, 300mm		0.73	1800	840	4.82804E-07
	Dry	0.24	620	840	4.60829E-07
	Dry	0.25	670	840	4.44208E-07
	Dry	0.26	720	840	4.29894E-07
	Dry	0.3	750	840	4.7619E-07
	Dry	0.28	770	840	4.329E-07
	Dry	0.29	820	840	4.21022E-07
	Dry	0.3	870	840	4.10509E-07
block, medium weight, 150mm		0.77	1900	840	4.82456E-07
block, medium weight, 300mm		0.83	1940	840	5.09327E-07
	Dry	0.31	920	840	4.01139E-07
	Dry	0.32	970	840	3.92734E-07
	Dry	0.35	1050	840	3.96825E-07
	Dry	0.4	1150	840	4.14079E-07
block, hollow, heavyweight, 300mm		1.35	1220	840	1.31733E-06
block, hollow, lightweight, 150mm		0.48	880	840	6.49351E-07
block, hollow, lightweight, 300mm		0.76	780	840	1.15995E-06
block, hollow, medium weight, 150mm		0.62	1040	840	7.09707E-07
block, hollow, medium weight, 300mm		0.86	930	840	1.10087E-06
block, partially filled, heavyweight, 300mm		1.35	1570	840	1.02366E-06
block, partially filled, lightweight, 150mm		0.55	1170	840	5.59626E-07
block, partially filled, lightweight, 300mm		0.74	1120	840	7.86685E-07
block, partially filled, medium weight, 150 mm		0.64	1330	840	5.72861E-07
block, partially filled, mediumweight, 300 mm		0.85	1260	840	8.03096E-07
block, perlite-filled, lightweight, 150mm		0.17	910	840	2.22397E-07
block, perlite-filled, mediumweight, 150mm		0.2	1070	840	2.22519E-07
block, with perlite, lightweight, 150mm		0.33	1180	840	3.3293E-07
block, with perlite, medium weight, 150 mm		0.39	1340	840	3.46482E-07
tiles		1.1	2100	840	6.23583E-07
Concrete, cast:					
aerated		0.16	500	840	3.80952E-07
		0.29	850	840	4.06162E-07

		0.42	1200	840	4.16667E-07
aerated, cellular		0.15	400	840	4.46429E-07
		0.23	700	840	3.91156E-07
		0.7	1000	840	8.33333E-07
		1.2	1300	840	1.0989E-06
aerated, cement/lime based		0.21	580	840	4.31034E-07

Material Properties (CIBSE Data) for Concrete					
Material	Condition	Thermal conductivity (W-m ⁻¹ K ⁻¹)	Density (kg m ⁻³)	Specific heat (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Thermal Diffusivity (M ² S ⁻¹)
cellular		0.16	480	840	3.96825E-07
	At 50°C	0.19	700	1050	2.58503E-07
cellular bonded		0.3	520	2040	2.82805E-07
dense		1.7	2200	840	9.19913E-07
compacted,		2.2	2400	840	1.09127E-06
dense, reinforced		1.9	2300	840	9.83437E-07
compacted		2.3	2500	840	1.09524E-06
expanded clay filling		0.26	780	840	3.96825E-07
		0.6	1400	840	5.10204E-07
foamed	At 50°C	0.07	320	920	2.37772E-07
	At 50°C	0.08	400	920	2.17391E-07
	At 50°C	0.15	700	920	2.32919E-07
foam slag		0.25	1040	960	2.50401E-07
glass reinforced		0.9	1950	840	5.49451E-07
heavyweight	Dry	1.3	2000	840	7.7381E-07
	Moist	1.7	2000	840	1.0119E-06
lightweight	Dry	0.2	620	840	3.84025E-07
	Dry	0.25	750	840	3.96825E-07
	Dry	0.21	670	840	3.73134E-07
	Dry	0.22	720	840	3.63757E-07
	Dry	0.23	770	840	3.55597E-07
	Dry	0.24	820	840	3.48432E-07
	Dry	0.25	870	840	3.42091E-07
	Moist	0.43	750	840	6.8254E-07
	Moist	0.38	770	840	5.87508E-07
	Moist	0.4	820	840	5.8072E-07
	Moist	0.43	870	840	5.88396E-07
		0.08	200	840	4.7619E-07
		0.12	300	840	4.7619E-07
		0.17	500	840	4.04762E-07
		0.23	700	840	3.91156E-07
medium weight	Dry	0.32	1050	840	3.62812E-07
	Dry	0.37	1150	840	3.83023E-07
	Dry	0.59	1350	840	5.20282E-07
	Dry	0.84	1650	840	6.06081E-07

	Dry	0.37	1050	840	4.19501E-07
	Dry	0.27	920	840	3.49379E-07
	Dry	0.29	980	840	3.52284E-07
	Moist	0.59	1050	840	6.88934E-07
		0.5	1000	840	5.95238E-07
		0.8	1300	840	7.32801E-07
		1.2	1600	840	8.92857E-07
		1.4	1900	840	8.77193E-07
medium weight, with lime	At 50°C	0.73	1650	880	5.02755E-07
no fines		0.96	1800	840	6.34921E-07
residuals of iron works		0.35	1000	840	4.16667E-07
		0.45	1300	840	4.12088E-07
		0.7	1600	840	5.20833E-07
		1	1900	840	6.26566E-07
roofing slab, aerated		0.16	500	840	3.80952E-07
vermiculite aggregate		0.17	450	840	4.49735E-07
very lightweight		0.14	370	840	4.5045E-07
		0.15	420	840	4.2517E-07
		0.16	470	840	4.05268E-07
		0.17	520	840	3.89194E-07
		0.18	570	840	3.7504E-07
		0.12	350	840	4.08163E-07
		0.18	600	840	3.57143E-07
Masonry:		0.19	470	840	4.81256E-07
block, lightweight		0.2	520	840	4.57875E-07
		0.22	570	840	4.59482E-07
		0.22	600	840	4.36508E-07
block, medium weight	Dry	0.6	1350	840	5.29101E-07
	Dry	0.85	1650	840	6.13276E-07
	Dry	1.3	1800	840	8.59788E-07
heavyweight	Dry	0.9	1850	840	5.79151E-07
	Dry	0.73	1850	840	4.69755E-07
	Dry	0.79	1950	840	4.82295E-07
	Dry	0.9	2050	840	5.22648E-07
	Moist	0.81	1650	840	5.84416E-07
lightweight	Dry	0.22	750	840	3.49206E-07
	Dry	0.27	850	840	3.78151E-07
	Dry	0.24	850	840	3.36134E-07
	Dry	0.27	950	840	3.38346E-07

medium weight	Dry	0.32	1050	840	3.62812E-07
	Dry	0.54	1300	840	4.94505E-07
	Dry	0.37	1150	840	3.83023E-07
	Dry	0.42	1250	840	0.0000004
	Dry	0.45	1350	840	3.96825E-07
	Dry	0.49	1450	840	4.02296E-07
	Dry	0.54	1550	840	4.14747E-07

10.1.2.Acero

Material Profile: Steel						
Embodied Energy (EE) Database Statistics - MJ/Kg						
Main Material	No. Records	Average EE	Standard Deviation	Minimum EE	Maximum EE	Comments on the Database Statistics:
Steel	180	31.25	16.50	6.00	95.70	None
<i>Steel, General</i>	154	29.36	13.45	6.00	77.00	
<i>50% Recycled</i>	2	32.75	20.88	18.00	47.50	
<i>Market Average</i>	11	25.68	5.92	18.20	36.00	
<i>Other Specification</i>	2	19.40	0.71	18.90	19.90	
<i>Predominantly Recycled</i>	33	13.60	4.86	6.00	23.40	
<i>Unspecified</i>	49	31.96	10.61	12.50	77.00	
<i>Virgin</i>	57	37.48	12.07	12.00	63.42	
<i>Steel, Stainless</i>	21	45.68	28.84	8.20	95.70	
<i>Market Average</i>	3	48.36	6.22	40.20	51.48	
<i>Predominantly Recycled</i>	2	11.00	0.00	11.00	11.00	
<i>Unspecified</i>	8	43.10	32.21	8.20	95.70	
<i>Virgin</i>	8	57.80	28.76	12.00	81.77	
<i>Steel, Structural</i>	5	30.91	3.74	25.50	35.90	
<i>Unspecified</i>	2	28.67	4.48	25.50	31.83	
<i>Virgin</i>	3	32.40	3.10	30.00	35.90	

Selected Embodied Energy & Carbon Values and Associated Data										
Material	Embodied Energy - MJ/Kg			Embodied Carbon - Kg CO2/Kg			Boundaries	Best EE Range - MJ/Kg		Specific Comments
	UK Typical	Primary	Secondary	UK Typical	Primary	Secondary		Low EE	High EE	
General Steel	24.4	35.3	9.50	1.77	2.75	0.43	Cradle to Gate	(+/- 30%)		Estimated from UK's consumption of types of steel, and worldwide recycled content 42.7%
Bar & rod	24.6	36.4	8.8	1.71	2.68	0.42				
Engineering steel	-	-	13.1	-	-	0.68				
Pipe	-	34.4	NTMR	-	2.7	NTMR				NTMR = Not Typical Manufacturing Route
plate	-	48.4	NTMR	-	3.19	NTMR				NTMR = Not Typical Manufacturing Route
Section	25.4	36.8	10.0	1.78	2.78	0.44				
Sheet	-	31.5	NTMR	-	2.51	NTMR				NTMR = Not Typical Manufacturing Route
Sheet - Galvanised	-	39.0	-	-	2.82	-				
Wire	-	36.0	-	-	2.83	-				
Stainless	56.7	-	-	6.15	-	-		11	81.8	4.3 MJ/kg Feedstock Energy (Included). World average data from Institute of Stainless Steel Forum (ISSF) was selected due to the large extent of the study. Values specified are for the most popular grade (304).
Comments	Assumed 42.7% worldwide recycled material, as used to estimate the typical market values. The best data resource was from the International Iron & Steel Institute (IISI), who completed to most detailed steel LCI to date. Some of the IISI data has been processed to fit into the categories (Primary, secondary material). The results of this study are in line with that expected from other sources. Please see note on recycling methodology at the front of the document.									

Material Scatter Graph	Fuel Split & Embodied Carbon Data
<div data-bbox="250 312 1052 699"> <p>EE Scatter Graph - Steel</p> </div> <div data-bbox="250 721 1052 1107"> <p>EE Scatter Graph - Stainless Steel</p> </div>	<p>No breakdown of fuel use or carbon emissions was available. There has not been an estimate of this breakdown by the author because the steel industry is complicated by the production of by-products (which may be attributed energy or carbon credits), excess electricity (they produce some of their own electricity) and non-fuel related emissions from the calcination of lime during the production process.</p>

Material Properties (CIBSE Data)					
Material	Condition	Thermal conductivity (W-m ⁻¹ K ⁻¹)	Density (kg m ⁻³)	Specific heat (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Thermal Diffusivity (M ² S ⁻¹)
stainless steel, 5% Ni		29	7850	480	7.69639E-06
stainless steel, 20% Ni		16	8000	480	4.16667E-06
steel		45	7800	480	1.20192E-05

10.2. CÁLCULOS ESTRUCTURALES DE ACERO

Este trabajo corresponde al documento “Ventajas estructurales del uso de dovelas trapezoidales frente a rectangulares en túneles ejecutados con TBM” – Autor: Sergio Cardozo, que fue dirigido por el tutor del presente trabajo final de máster

10.2.1.DOVELA TRAPEZOIDAL

Comparación dovela del anillo trapezoidal con dovela del proyecto “Asia”

Para esta comparación se utilizará la dovela 03 del anillo ya que es la que presenta mayores valores en los resultados de cálculo y se comparará con una dovela del proyecto “Asia”. A continuación, en la Tabla se muestran los datos para el cálculo y la Tabla 11 el cálculo de refuerzo a flexión.

Dovela 03 - Anillo trapezoidal					
Mmax	KN*m/m	KN*m	Vmax	KN*m/m	KN
	112.9	180.7		161.0	257.5

DATOS

Dimensiones de la sección

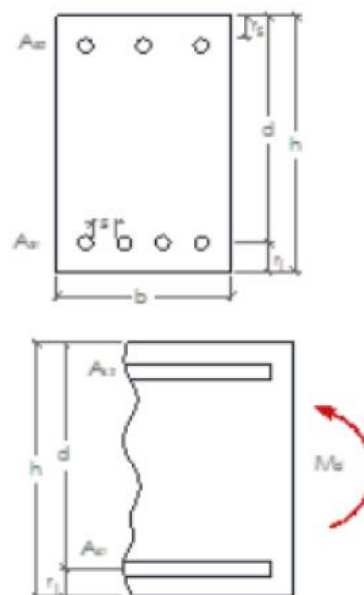
h	0.35	m
b	1.6	m
$r_{flec,inf}$	0.05	m
$r_{flec,sup}$	0.05	m
d	0.30	m

Características de los materiales

f_{yk}	500	N/mm ²
f_{ak}	50	N/mm ²
T.M.A.	15	mm
γ_s	1.15	u
γ_c	1.5	u
α_{cc}	1	u
f_{yd}	434.8	N/mm ²
f_{ed}	33.33	N/mm ²

Esfuerzos de cálculo

M_d	180.7	m·kN
-------	-------	------



CÁLCULOS

Diagrama rectangular

x_{UM}	0.19	m
y_{UM}	0.15	m
$F_{c,UM}$	7895.8	kN
M_{UM}	1784.3	mkN

$M_d < M_{lim}$

x	0.014	m
y	0.012	m
F_c	614.12	kN

RESULTADOS: DIMENSIONADO DE LA ARMADURA

Armadura mínima de cálculo

A_{s1}	14.12	cm ²
A_{s2}	0.00	cm ²

Armadura mínima de norma

A_{s1}	17.10	cm ²
A_{s2}	4.70	cm ²

La cuantía de refuerzo requerido para el momento en cuestión es $A_{s1}=14,12 \text{ cm}^2$, se eligió un refuerzo de 14Ø12 ($A_s=14,70 \text{ cm}^2$). La Tabla 12 muestra cálculo de refuerzo a corte.

DATOS

Dimensiones de la sección

h	0.35	m
b_0	1.6	m
$r_{fisc,inf}$	0.05	m
$r_{fisc,sup}$	0.05	m
d	0.30	m

Características de los materiales

f_{yk}	500	N/mm ²
f_{yk}	500	N/mm ²
f_{ck}	50	N/mm ²
Control del hormigón	Directo	
f_{cv}	50.00	N/mm ²
TMA	15	mm
γ_s	1.15	u
γ_c	1.5	u
α_{cc}	1	u
f_{yd}	434.78	N/mm ²
f_{yld}	434.78	N/mm ²
f_{cd}	33.33	N/mm ²
E_s	2.E+05	N/mm ²

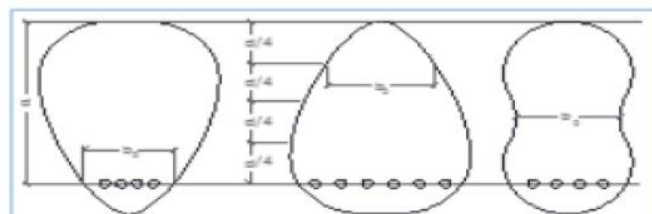
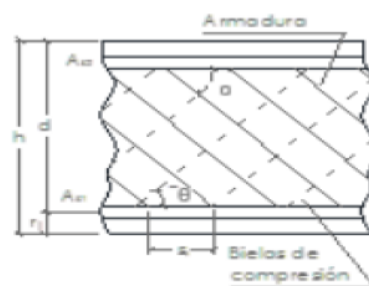
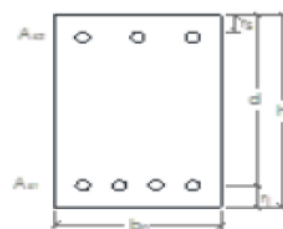
Disposición de las armaduras

$\#b_s$	3	ud.
\varnothing_s	25	mm
A_s	14.73	cm ²

$\#b_s$	5	ud.
\varnothing_s	25	mm
A_s	24.54	cm ²
θ_1	45	°
α_1	90	°
$S_{L,corde}$	10	cm
$\#RAVAS$	4	ud.

Esfuerzos de cálculo

V_{ed}	257.5	kN
N_{ed}	0	kN
M_{ed}	180.7	m·kN



CÁLCULOS

Factores y coeficientes.

Relativos a los materiales

f_{tad}	20.00	N/mm ²
f_{ck}	2.65	N/mm ²
f_{td}	1.00	N/mm ²
f_{sd}	4.07	N/mm ²

Relativos a los esfuerzos

K	1.00	ud.	(39.1)
σ_{ad}	0.00	N/mm ²	

Relativos a la sección

I_x	0E-03	m ⁴
S	0.02	m ³
ξ	1.62	ud.
ρ	5.17	%
θ_s	45	°
β	1.00	ud.

Resultados

Agotamiento por compresión oblicua del alma:

V_{ut}	4800.00	kN
Δb_{od}	0.00	%

La sección cumple

Agotamiento por tracción del alma:

M_{ut}	82.07	mKN
Fisura y no requiere armadura		
$V_{ut,mac}$	415.48	kN
V_{cu}	256.86	kN

RESULTADOS: DIMENSIONADO DE LA ARMADURA

Valores estrictos de norma:

S_{cercos}	22.50	cm
$A_{s,mac}$	0.00	cm ² /m
$A_{s,geom}$	0.22	cm ² /m

Otros datos geométricos de interés

A_{trunca}	0.020	cm ² /trunca
$S_{trunca MAX}$	30	cm

Combinaciones de armado

ϕ_{st} (mm)	#tramos (ud)	$A_{s,real}$ (cm ² /m)	S_{cercos} (cm)	$V_{s,real}$ (kN)
6	4	5.03	22.50	63.06
8	4	8.04	22.50	112.11
10	4	13.06	22.50	175.18
12	4	20.11	22.50	252.25
14	4	27.37	22.50	343.34
16	4	35.74	22.50	448.45
20	4	55.65	22.50	700.70

(#tramos, fijo)

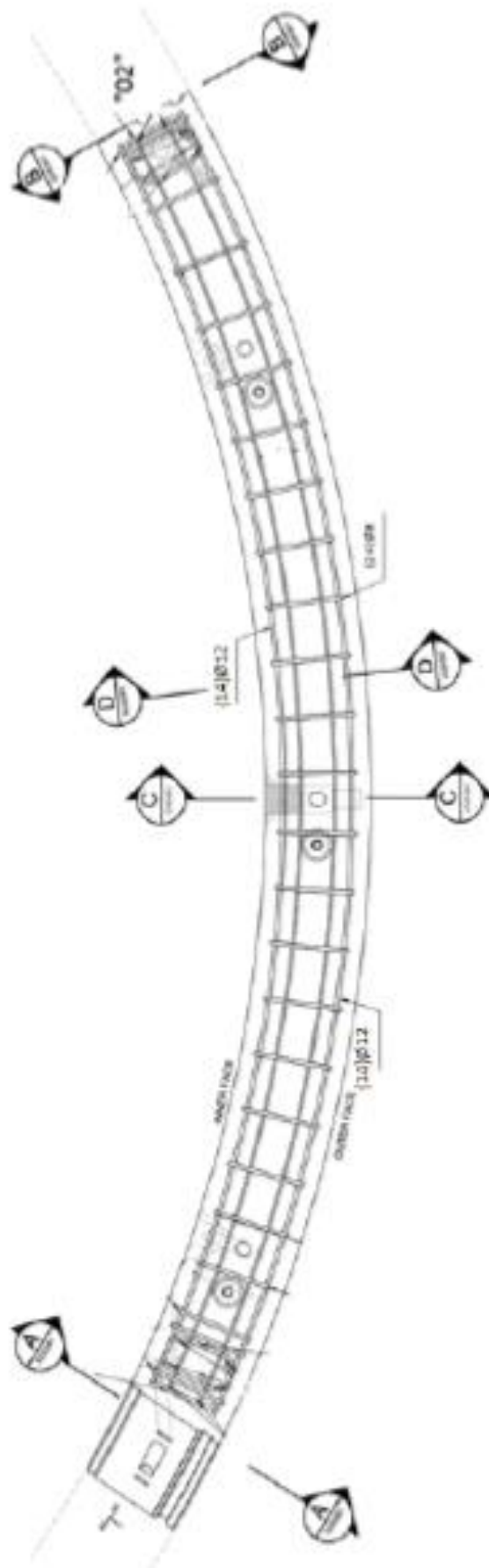
Combinaciones de armado

ϕ_{st} (mm)	#tramos (ud)	$A_{s,real}$ (cm ² /m)	S_{cercos} (cm)	$V_{s,real}$ (kN)
6	2	5.05	10.00	70.05
8	2	10.05	10.00	120.13
10	2	15.71	10.00	197.07
12	2	22.62	10.00	283.78
14	2	30.79	10.00	386.26
16	2	40.21	10.00	504.57
20	2	62.63	10.00	788.29

(S_{cercos} , fijo)

NOTA: Los valores tachados no cumplen separación entre ramas.

Por tanto se utilizara como refuerzo a cortante Ø8c/20 que por la longitud total de la dovela (437,48 cm) será 24Ø8. En las siguientes figuras se puede apreciar el armado de la dovela 03 trapezoidal y el armado en la dovela del proyecto "Asia", respectivamente.



Tal como se puede apreciar en los esquemas de armaduras la dovela 03 del anillo trapezoidal tiene mayor refuerzo a flexión que la del proyecto “Asia”, siendo los valores $14\varnothing 12$ y $11\varnothing 12$ respectivamente, el refuerzo a cortante es el mismo para ambos $24\varnothing 8$. Por tanto, según los resultados obtenidos en este estudio, la dovela del proyecto “Asia” necesitaría mayor refuerzo a flexión.

10.2.2.DOVELA RECTANGULAR

Comparación dovela del anillo rectangular con dovela del proyecto “América”

De la misma manera se utilizará la dovela 03 del anillo rectangular ya que es la que presenta mayores valores y se comparará con una dovela del proyecto “América”. A continuación, en la Tabla se muestra los datos para el cálculo y en la Tabla 14 el cálculo de refuerzo a flexión.

Dovela 03 - Anillo rectangular					
Mmax	KN*m/m	KN*m	Vmax	KN*m/m	KN
	119.1	190.5		137.7	220.3

DATOS

Dimensiones de la sección

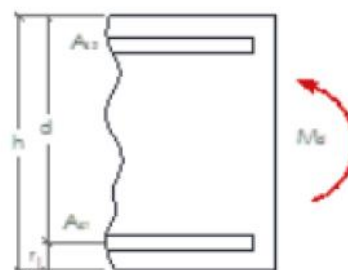
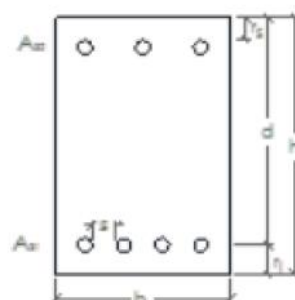
h	0.35	m
b	1.8	m
$r_{\text{flec, inf}}$	0.05	m
$r_{\text{flec, sup}}$	0.05	m
d	0.30	m

Características de los materiales

f_{yk}	500	N/mm ²
f_{ek}	50	N/mm ²
T.M.A.	15	mm
γ_s	1.15	u
γ_c	1.5	u
α_{cc}	1	u
f_{yd}	434.8	N/mm ²
f_{cd}	33.33	N/mm ²

Esfuerzos de cálculo

M_c	190.5	m·kN
-------	-------	------



CÁLCULOS

Diagrama rectangular

x_{UM}	0.19	m
y_{UM}	0.15	m
$F_{c,UM}$	7895.8	kN
M_{UM}	1784.3	mkN

$M_d < M_{lim}$

x	0.015	m
y	0.012	m
F_c	648.13	kN

RESULTADOS: DIMENSIONADO DE LA ARMADURA

Armatura mínima de cálculo

A_{s1}	14.91	cm ²
A_{s2}	0.00	cm ²

Armatura mínima de norma

A_{s1}	17.10	cm ²
A_{s2}	4.70	cm ²

La cuantía de refuerzo requerido para el momento en cuestión es $A_{s1}=14,91 \text{ cm}^2$, se eligió un refuerzo de $14\varnothing 12$ ($A_s=14,70 \text{ cm}^2$). La siguiente table muestra cálculo de refuerzo a corte.

DATOS

Dimensiones de la sección

h	0.35	m
b_0	1.6	m
$r_{MEC,INF}$	0.05	m
$r_{MEC,SUP}$	0.05	m
d	0.30	m

Características de los materiales

f_{tk}	500	N/mm ²
f_{yk}	500	N/mm ²
f_{ck}	50	N/mm ²
Control del hormigón → Directo		
f_{cy}	50.00	N/mm ²
TMA	15	mm
v_s	1.15	u
v_c	1.5	u
α_{oc}	1	u
f_{yd}	434.78	N/mm ²
$f_{yd,e}$	434.78	N/mm ²
f_{cd}	33.33	N/mm ²
E_s	2.E+05	N/mm ²

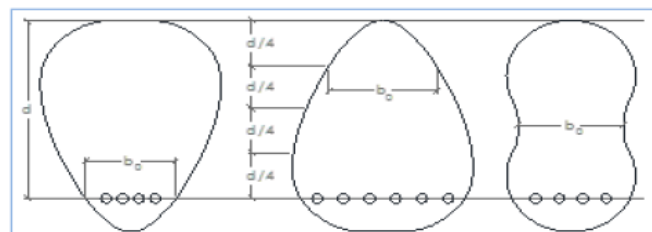
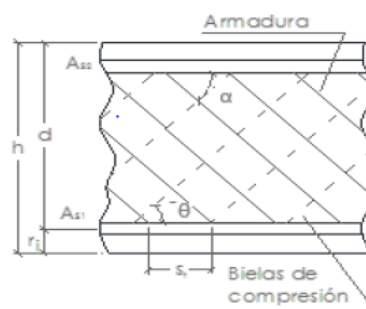
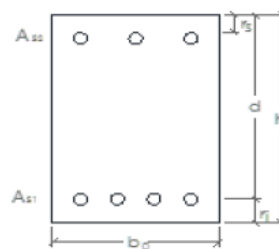
Disposición de las armaduras

$\#b_s$	3	ud.
\varnothing_s	25	mm
A_s	14.73	cm ²

$\#b_s$	5	ud.
\varnothing_s	25	mm
A_s	24.54	cm ²
θ_t	45	°
α_t	90	°
$S_{t,ceroos}$	10	cm
$\#RAMAS$	4	ud

Esfuerzos de cálculo

V_{rd}	220.3	kN
N_d	0	kN
M_d	190.5	m·kN



CÁLCULOS

Factores y coeficientes.

Relativos a los materiales

f_{100}	20.00	N/mm ²
$f_{ct,k}$	2.85	N/mm ²
$f_{ct,d}$	1.90	N/mm ²
$f_{ct,m}$	4.07	N/mm ²

Relativos a los esfuerzos

K	1.00	ud.	(39.1)
σ_{00}	0.00	N/mm ²	

Relativos a la sección

I_z	6E-03	m ⁴
S	0.02	m ³
ξ	1.82	ud.
ρ_l	5.11	%
θ_e	45	°
β	1.00	ud.

Resultados

Agotamiento por compresión oblicua del alma:

V_{U1}	###	kN
Δb_{0xd}	0.00	%

La sección cumple

Agotamiento por tracción del alma:

M_{fs}	62.07	mKN
Fisura y no requiere armadura		
$V_{U2,meo}$	415.48	kN
V_{CU}	#####	kN

RESULTADOS: DIMENSIONADO DE LA ARMADURA

Valores estrictos de norma:

$S_{t,ceroos}$	22.50	cm
$A_{a,meo}$	0.00	cm ² /m
$A_{a,geom}$	0.22	cm ² /m

Otros datos geométricos de interés

$A_{a/grupo}$	0.020	cm ² /grupo
$S_{t,trans MAX}$	30	cm

Combinaciones de armado

$\emptyset_{s,t}$ (mm)	#RAMAS (ud)	$A_{a,real}$ (cm ² /m)	$S_{t,ceroos}$ (cm)	$V_{SU,real}$ (kN)
6	4	5.03	22.50	63.06
8	4	8.94	22.50	112.11
10	4	13.96	22.50	175.18
12	4	20.11	22.50	252.25
14	4	27.37	22.50	343.34
16	4	35.74	22.50	448.45
20	4	55.85	22.50	700.70

(#RAMAS, fijo)

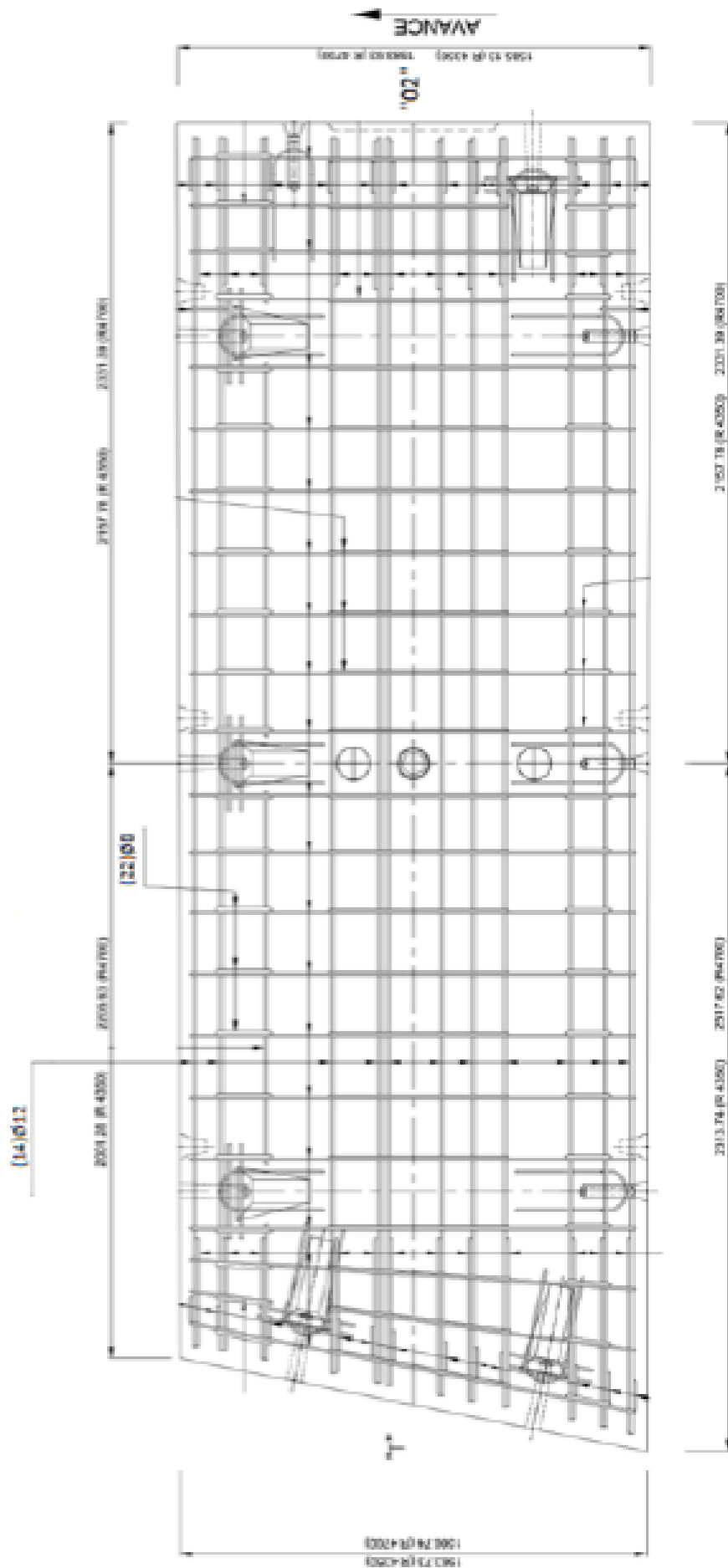
Combinaciones de armado

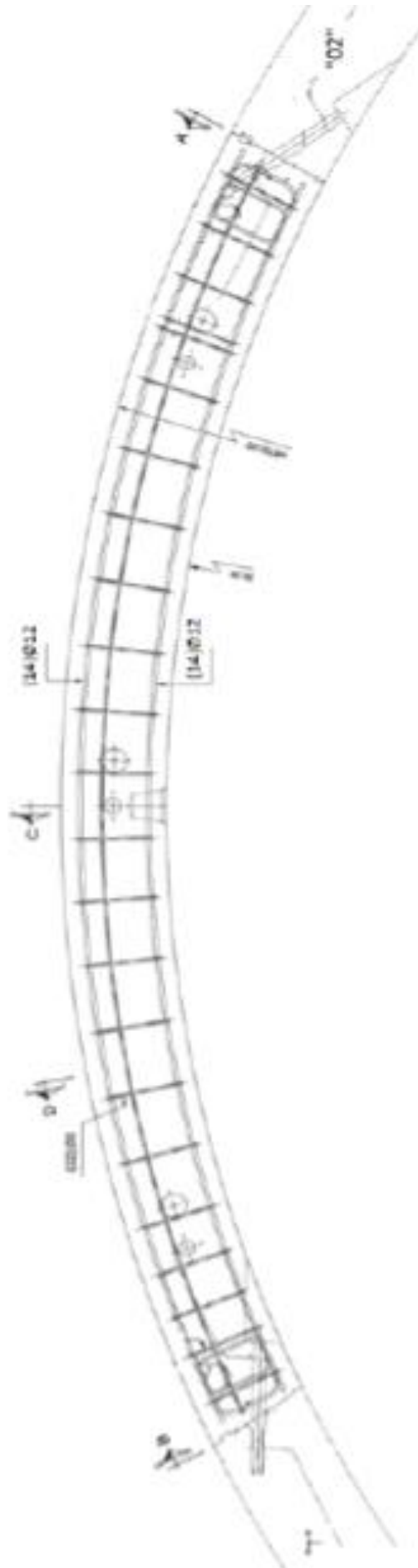
$\emptyset_{s,t}$ (mm)	#RAMAS (ud)	$A_{a,real}$ (cm ² /m)	$S_{t,ceroos}$ (cm)	$V_{SU,real}$ (kN)
6	2	5.65	10.00	70.95
8	2	10.05	10.00	126.13
10	2	15.71	10.00	197.07
12	2	22.62	10.00	283.78
14	2	30.79	10.00	386.26
16	2	40.21	10.00	504.51
20	2	62.83	10.00	788.29

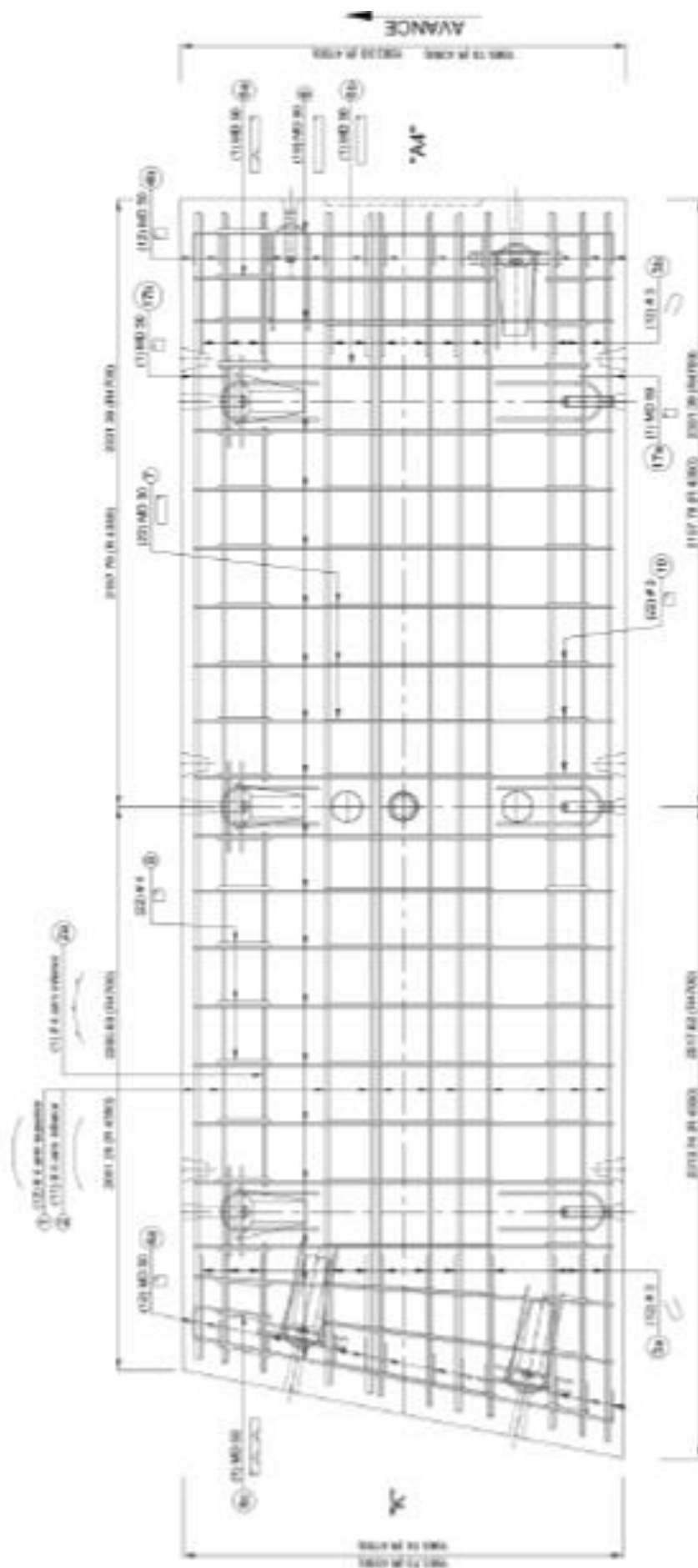
($S_{t,ceroos}$, fijo)

NOTA: Los valores tachados no cumplen separación entre ramas.

Se utilizará como refuerzo a cortante Ø8c/20 que por la longitud total de la dovela (453,73 cm) será 22Ø8. En las siguientes figuras se puede apreciar el armado de la dovela 03 rectangular y el armado de la dovela del proyecto "América", respectivamente.







En los esquemas de armaduras se pudo observar que la dovela 03 del anillo rectangular tiene mayor refuerzo a flexión que la del proyecto “América”, siendo los valores 14Ø12 y 12Ø12 respectivamente, el refuerzo a cortante es el mismo para ambos 22Ø8. Por tanto, según los resultados obtenidos en este estudio, la dovela del proyecto “América” necesitaría mayor refuerzo a flexión.